

Aus der Klinik für Kieferorthopädie
Klinische Medizin
der Medizinischen Fakultät
der Universität des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Professor Dr. Jörg Lisson

**Abweichungen bei Messungen des Irregularitätsindex
in Abhängigkeit von der Positionierung kieferorthopädischer
Modelle im 3D-Scanner**

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnheilkunde
der Medizinischen Fakultät
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2017

vorgelegt von: Jean Manfred Michel Simon
geb. am: 21.02.1991 in Ettelbrück / Luxemburg

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
1.1	Summary.....	2
2	Einleitung.....	3
2.1	Die kieferorthopädische Modellanalyse.....	3
2.1.1	Irregularitätsindex nach Little.....	3
2.2	Konventionelle und digitale Modelle.....	4
2.3	Methoden zur dreidimensionalen Modelldarstellung.....	5
2.4	Die computergestützte Modellauswertung	7
2.5	Literaturübersicht.....	8
2.6	Ziele der Untersuchung	8
3	Material und Methode.....	10
3.1	Material.....	10
3.2	Methode	10
3.2.1	Manuelle Messung.....	10
3.2.2	Digitale Messung	11
3.2.3	Erhobene Parameter	12
3.3	Statistische Analyse.....	14
3.3.1	Gegenüberstellung der digitalen Scangruppen	14
3.3.2	Vergleich zwischen manueller und digitaler Auswertung.....	15
3.4	Intraraterreliabilität	15
3.4.1	Manuelle Messwiederholung	15
3.4.2	Digitale Messwiederholung	16
3.5	Grafische Darstellung im Bland-Altman-Diagramm	16
4	Ergebnisse.....	18
4.1	Gegenüberstellung der digitalen Scangruppen.....	18
4.2	Vergleich zwischen manueller und digitaler Auswertung	21
4.3	Ergebnisse der Messwiederholung der digitalen Auswertung der drei Scangruppen.....	22
4.4	Ergebnisse der Messwiederholung der manuellen Auswertung.....	23
5	Diskussion	24
5.1	Material und Methode.....	24

5.1.1	Modellpaare	24
5.1.2	Manuelle und digitale Auswertung.....	24
5.1.3	Statistische Auswertung.....	27
5.2	Ergebnisse.....	28
5.2.1	Intrarraterreliabilität der manuellen und digitalen Messwiederholung.....	28
5.2.2	Vergleich zwischen manueller und digitaler Auswertung	29
5.2.3	Gegenüberstellung der digitalen Scangruppen	32
5.3	Schlussfolgerung	33
6	Literaturverzeichnis	34
7	Danksagung	39
8	Anhang.....	40
8.1	Gegenüberstellung der drei Scangruppen.....	40
8.1.1	Oberkiefer	40
8.1.2	Unterkiefer	44
8.2	Ergebnisse der Messwiederholung der drei Scangruppen.....	47
8.2.1	Oberkiefer	47
8.2.2	Unterkiefer	49
8.3	Manuell - digitaler Vergleich	50
8.3.1	Oberkiefer	51
8.3.2	Unterkiefer	52
8.4	Ergebnisse der Messwiederholung der manuellen Messung	53
8.4.1	Oberkiefer	53
8.4.2	Unterkiefer	55

1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie wurde durchgeführt um zu klären, ob eine ante - oder retroinklinierte Position von Gipsmodellen im Modellscanner im Vergleich zur regelrechten Positionierung zu veränderten Messwerten führt. Des Weiteren sollte geprüft werden, ob die computergestützte Ausmessung von Modellscans eine valide Alternative zur konventionellen Ausmessung von Modellen darstellt.

Das Untersuchungsgut bestand aus 44 Gipsmodellen des Ober- und Unterkiefers von kieferorthopädisch unbehandelten Patienten. Für die digitale Auswertung wurden die Modelle in drei verschiedenen Positionen mithilfe eines Streifenlichtprojektionsscaners digitalisiert und anschließend ausgewertet. Die Scans wurden anschließend in drei Gruppen unterteilt: regelrecht, retroinkliniert und anteinkliniert. Eine Erhebung der digitalen Messwerte der Modellscans erfolgte an zwei verschiedenen Zeitpunkten, eine Erhebung der manuellen Messwerte der Gipsmodelle an drei verschiedenen Zeitpunkten. Beide Methoden erfassten die gleichen Parameter. Diese wurden anschließend, nach Überprüfung auf ihre Normalverteilung mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) und dem t-Test für verbundene Stichproben ausgewertet. Die statistische Analyse untersuchte einerseits Unterschiede zwischen den digitalen Scangruppen, andererseits wurde die manuelle mit der digitalen Messmethode verglichen. Hierfür wurden die gemessenen Parameter in die Gruppen Little Irregularitätsindex (II), Längen (L) und Zahnbreiten (ZB) unterteilt. Darüber hinaus wurden beide Messmethoden auf Differenzen zwischen den wiederholt erhobenen Messungen untersucht.

Die Auswertungen der manuellen Messwiederholungen zeigte, dass sich die Resultate zum Zeitpunkt 2 und 3 nicht signifikant voneinander unterschieden. Die wiederholten digitalen Messungen ließen ebenfalls keine relevanten Unterschiede zwischen den Scangruppen erkennen. Jedoch zeigten die manuellen Messungen im Vergleich zu den digitalen Messungen eine geringfügig bessere Reliabilität. Des Weiteren erbrachte die Gegenüberstellung von manueller und digitaler Auswertung statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen II und ZB. Für die Gruppe L konnten keine Differenzen festgestellt werden. Ein Vergleich der digitalen Scangruppen zeigte mehrheitlich statistisch signifikante Unterschiede. Für die Gruppe L im Oberkiefer und die Gruppe II im Unterkiefer konnten durchschnittlich jedoch keine Differenzen ermittelt werden.

1.1 Summary

Variances of the Little Irregularity index due to anterior or posterior inclination of plaster casts in a 3D scanner, compared to the manual analysis.

The present study was undertaken to clarify whether an anterior or posterior inclination of plaster casts in a 3D scanner would have an effect on the measurements. The second purpose of this study was to determine if the digital analysis is a reliable and valid alternative to the conventional manually method of manually measuring plaster casts.

A total of 44 plaster casts, which included the upper and lower jaw were digitized using a three-dimensional model scanner based on stripe-light projection technology. The differentiation of the digitized models was classified into a correct, an anterior inclined and a posterior inclined group. The digital measurements were performed twice, the manual measurements were performed thrice, in order to evaluate their reliability. The data was checked for normal distribution and afterwards statistically evaluated, using two statistic devices: analysis of variance (ANOVA) and t-test. On the one hand the statistical analysis examined the differences between the digital groups, on the other hand the digital and the manual method were compared. For this purpose, the data was divided into three squads; Little irregularity index (II), Lengths (L) and Tooth widths (ZB).

The analysis of the remeasured manual data showed that no significant differences existed for measurements taken at point 2 and 3. The repeated digital measurements did not differ significantly between the three scanned groups. The digital method showed however slightly better reliability than the manual method. Furthermore, the comparison of the manual and digital method showed significant differences for the squads II and ZB. The squad L did not show any significant differences on average. Excepted for the squad L in the upper jaw and the squad II in the lower jaw, statistical differences could be observed for the majority of the analysis of the digital groups.

2 Einleitung

2.1 Die kieferorthopädische Modellanalyse

Ziele der kieferorthopädischen Diagnostik und Therapie sind das Erkennen und Behandeln von Dysgnathien (1). Neben einer ausführlichen Anamnese müssen ein extra- und intraoraler Befund, ein Funktionsbefund, eine Modellanalyse und Röntgenbefunde erhoben werden. Erst nach Auswertung aller erhobenen Daten ist es dem Kieferorthopäden möglich aufgrund aller Diagnosen einen individuellen Behandlungsplan für den Patienten zu erstellen. Die Modellanalyse besteht in der metrischen Auswertung eines dreidimensional ausgerichteten Modells. Abweichungen von Mittelwerten werden dabei systematisch in den drei Raumebenen registriert. Zunächst werden Zahnstellungsanomalien im Einzelkiefer, anschließend Anomalien der Okklusion und Kieferposition erfasst (2). Alle Abweichungen werden im Verlauf der Modellanalyse in Abhängigkeit von drei Bezugsebenen bestimmt; der Raphe-Median-Ebene, der Tuberebene und der Okklusionsebene. Diese drei Ebenen stehen jeweils im 90°-Winkel zueinander. Die Raphe-Median-Ebene wird zum einen durch den Kreuzungspunkt der zweiten queren Gaumenfalte mit der Raphe palatina media und zum anderen durch die Spina nasalis posterior am Übergang zum weichen Gaumen definiert. In dieser Ebene werden transversale Abweichungen erfasst. Die Tuberebene steht senkrecht auf der Raphe-Median-Ebene und tangiert die Tubera des Oberkiefers. Sie dient der Erfassung sagittaler Abweichungen. Die Okklusionsebene steht senkrecht zur Raphe-Median-Ebene und zur Tuberebene und wird durch die mesiobukkalen Höcker der 1. Molaren und durch die bukkalen Höcker der Prämolaren gebildet. Anhand dieser Ebene lassen sich vertikale Abweichungen begutachten (1). Das kieferorthopädische Modell erlaubt dem Behandler die intraorale Situation separat, aus dem Organverband herausgelöst, zu untersuchen. Die Modellanalyse vermittelt entscheidende Erkenntnisse für die therapeutische Festlegung von Behandlungsziel und Behandlungsplan (3).

2.1.1 Irregularitätsindex nach Little

Ein wichtiger Bestandteil der kieferorthopädischen Modellanalyse ist die Beurteilung und Erfassung von Zahnengständen. Diese sind mit ca. 60% die häufigsten Zahnstellungsanomalien im kieferorthopädischen Patientengut (1). Der Zahnengstand beschreibt ein Missverhältnis zwischen Zahn- und Kiefergröße zuungunsten der Zahngröße (2). Ein Engstand äußert sich symptomatisch durch Staffelstand, Außenstand, Rotationen, Teilretentionen, Retentionen

und/oder Kippungen in mesiodistaler Richtung oder orovestibulärer Richtung. Im Rahmen der metrischen Beurteilung lässt sich der Engstand einerseits durch das Verhältnis der mesiodistalen Breitensumme der Zähne und dem vorhandenen Platzangebot im Kiefer ermitteln. Andererseits kann der Engstand durch Messen der orovestibulärer Abweichungen der Zähne vom idealen Zahnbogen erfasst werden.

1975 beschrieb Little einen Index zur reproduzierbaren und quantitativen Beurteilung des Frontzahnengstandes im Unterkiefer. Der so genannte Irregularitätsindex erfasst die orovestibulären Abstände der anatomischen Kontaktpunkte jedes einzelnen Frontzahnes zu seinem angrenzenden Nachbarzahn. Die Summe dieser fünf Messungen gibt Auskunft über den Grad der anterioren Abweichung und stellt die Strecke dar, um welche die Zähne vom idealen Zahnbogen abweichen. Das Modell wird von okklusal, mit Blick auf die Inzisialkanten der unteren Schneidezähne betrachtet. Der Messschieber wird parallel zur Okklusionsebene geführt, wobei nur die orovestibulären Abweichungen gemessen werden. Vertikale Abweichungen der Kontaktpunkte und mesiodistale Lücken werden per Definition nicht berücksichtigt (4).

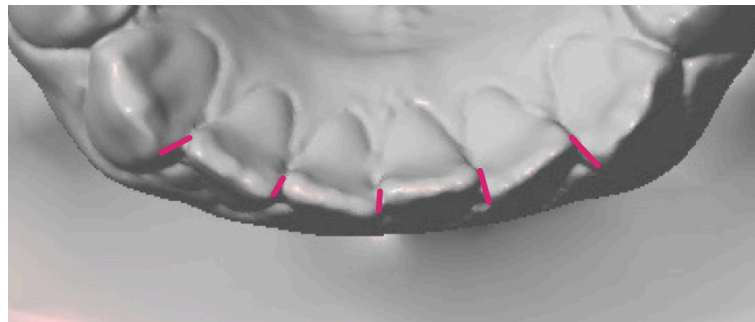


Abb. 1: Little Irregularitätsindex: Abstände zwischen den anatomischen Kontaktpunkten der Zähne 33 bis 43

2.2 Konventionelle und digitale Modelle

Die Verwendung von Gipsmodellen ist der heutige Goldstandard für die kieferorthopädische Diagnostik. Ein wesentlicher Vorteil liegt in der plastischen Handhabung der Modelle. Nachteilig ist allerdings der benötigte Platzbedarf für die Lagerung und Aufbewahrung. Das Modell erfüllt neben der Vermessung im Rahmen der Modellanalyse den Zweck eines Dokumentationsmittels. Die gesetzliche Aufbewahrungsfrist kieferorthopädischer Modelle beträgt laut § 630 f Abs. 3 BGB nach Abschluss der Behandlung 10 Jahre und lässt den Platzbedarf somit kontinuierlich ansteigen (5). Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die

Gipsmodelle anfällig für Verschleiß und Bruch sind, wodurch wichtige Informationen der intraoralen Situation verloren gehen können. Auch sind Gipsmodelle bei konsiliarischen Fragen oder Gutachten unterlegen, da ein neues Gipsmodell durch Duplizierung erstellt werden muss um einen optimalen Austausch zwischen Behandler und / oder Gutachter zu gewährleisten (6)(7)(8)(9). Das gestaltet sich umständlich und zeitaufwendig. Das Versenden dieser Modelle ist zudem unhandlich und Beschädigungen während des Transportes können nicht ausgeschlossen werden.

Mit zunehmender Digitalisierung der Zahnmedizin bieten digitale Modelle die Möglichkeit den Großteil der Nachteile von konventionellen Gipsmodellen zu umgehen. Digitale Modelle sind unempfindlich für physikalische Schäden und beanspruchen eine zu vernachlässigende Aufbewahrungsfläche, da diese Daten auf Speicherträger wie beispielsweise Festplatten, CD-ROMs oder USB-Sticks gesichert werden. Somit gestaltet sich auch der Zugriff auf die benötigten Daten wesentlich schneller. Ein gleichzeitiges Betrachten der selben Datei über mehrere praxisinterne Rechner stellt kein Problem dar und vereinfacht die Patientenbehandlung. Kopien einer oder mehrerer Dateien können in unbestimmter Zahl hergestellt und ohne Zeitverzug an Kollegen oder Gutachter über elektronischem Wege übermittelt werden. Seitens des Patienten können digitale Modelle helfen den Verlauf einer Therapie deutlicher zu veranschaulichen und somit zu einer verbesserten Kommunikation beitragen (7).

Das Interesse an einer Alternative zur herkömmlichen Archivierung von Patientenmodellen steigt (10). Bereits in diversen anderen Bereichen der Kieferorthopädie sind Abläufe digitalisiert worden. Neben den Patientenakten, der Terminverwaltung auch in Bereichen der Diagnostik wie beispielsweise der Fotodokumentation oder der Röntgendiagnostik.

2.3 Methoden zur dreidimensionalen Modelldarstellung

Erste Versuche zur dreidimensionalen Modelldarstellung begannen mit der Stereofotogrammetrie. Hierbei fotografieren zwei Kameras mit einer parallel ausgerichteten Aufnahmeachse das zu erfassende Objekt. Durch Überlagerung der beiden Aufnahmen entsteht ein räumliches, plastisches Bild. Bereits 1944 beobachtete Thalmann-Degan anhand von Stereofotogrammetrie Veränderungen der Gesichtsmorphologie nach kieferorthopädischen Behandlungen (11). 1969 schlugen Cheffins und Clark die Fotogrammetrie als Methode für kieferorthopädische Messungen vor (12). In seinem Studienaufbau nutzte Höflinger 1996 zwei digitale Kameras zur Modelldigitalisierung (13). Die digitalen Aufnahmen von Ober- und

Unterkiefer wurden mithilfe von intraoralen Spiegeln angefertigt. Die Fotografien beider Kameras wurden anschließend am Computer zu einer virtuellen Abbildung des Zahnbogens summiert.

Einen weiteren Ansatz zur Modelldigitalisierung stellten Miras und Sanders 1993 mit der Beschreibung der Holografie dar (14). Dabei handelt es sich um eine laserfotografische Technik zur Aufnahme und Rekonstruktion von Bildern, die es ermöglicht die dreidimensionalen Aspekte des Objektes beizubehalten (14). Diverse Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass die Auswertungen von Hologrammen in ihrer Genauigkeit den konventionellen Auswertungen an Gipsmodellen ebenbürtig sind oder diese gar übertreffen (14)(15)(16). Rydén et al. untersuchten Zahnbewegungen durch Überlagerung zweier Hologrammaufnahmen, wobei sie die Okklusalfächen und die Rugae palatini als Referenzstruktur nutzten (15).

Eine Erstellung computergestützter 3D-Modelle mittels Laserstrahlen wurde durch die Autoren Kuroda et al. (17) und Alcañiz et al. (18) untersucht. Die Methode wurde im Vergleich zur manuellen Ausmessung von Gipsmodellen als ausreichend genau gewertet. Das Verfahren wies jedoch Probleme beim Scan in Bereichen des Unterschnittes auf. Diese Bereiche konnten nicht erfasst werden und führten zu digitalen Löchern in den Modellen. Später gelang es einigen Autoren dieses Problem durch verschiedener Aufnahmewinkel zu lösen (19)(20). Das 3D-Laserscannen stellt jedoch aufgrund der langen Messzeiten und den damit verbundenen Distorsionen durch Bewegungsartefakte, sowie den erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen keine attraktive Alternative dar (11).

Eine weitere Möglichkeit zur Erstellung digitaler Modelle stellt die Computertomographie (CT) dar, ein bildgebendes, dreidimensionales Verfahren aus der Radiologie. Die Genauigkeit eines CT-Scans ist ausreichend präzise um vergleichbare Werte wie bei einer manuellen Analyse zu erzielen. El-Zatany et al. stellten 2010 eine Übereinstimmung zwischen der digitalen Auswertung eines Kopf-CTs und den manuellen Messungen an Gipsmodellen fest (21). Die zusätzliche Strahlenbelastung des Patienten schließt diese Methode als routinemäßige Untersuchung jedoch aus. Aus diesem Grund prüften die Autoren Wiranto et al. (22) und Rangel et al. (23), ob ein CT einer Abformung die gleiche Genauigkeit aufweist wie konventionelle Messungen, was in ihren Untersuchungen bestätigt werden konnte. White et al. kamen 2010 zu ähnlichen Ergebnissen, stellten jedoch eine fehlende Genauigkeit der CT-Scans in Bezug auf die Relation beider Kiefer in Okklusion fest (24).

2.4 Die computergestützte Modellauswertung

1999 brachte die Firma OrthoCADTM erstmals die Technologie der digitalen Modelle auf den Markt. Die benötigte Software wurde von der Firma zum Download angeboten. OrthoCADTM benötigte die entsprechenden Alginatabformungen und ein Bissregistrat zur Erstellung der digitalen Modelle. Die Abformungen wurden in Modelle überführt und anschließend mit einem patentierten Scanverfahren digitalisiert. Die Zuordnung von Ober - zu Unterkiefer wurde mithilfe des Bissregistrats erreicht. Nach spätestens fünf Tagen wurden die Daten auf dem OrthoCADTM - Server zum Download bereitgestellt. Die Speicherzeit auf den Firmen - Server betrug 10 Jahre (7).

Zwei Jahre später bot die Firma GeoDigm mit emodelsTM eine Alternative. Die benötigte Software wurde frei zum Download bereitgestellt. Alginatabformung und Bissregistrat mussten der Firma zugesandt werden. Nach Erhalt erstellte GeoDigm Gipsmodelle welche anschließend durch einen Streifenlichtscanner digitalisiert wurden. Nach fünf Tagen konnten die Dateien von der firmeneigenen Webseite heruntergeladen werden (7).

Mittlerweile hat sich durch die Weiterentwicklung der Techniken und dem Nachzug anderer Anbieter ein breites Spektrum etabliert. Modellscanner seit der Einführung von Desktopscannern wie dem orthoX[®] 3D-Modellscanner nicht mehr großen Firmen wie GeoDigm oder OrthoCADTM vorbehalten. Die Geräteanforderungen und die Anschaffungskosten sind hierbei breit gefächert. Um digitale Modelle erstellen und nutzen zu können wird eine Personal Computer (PC) mit Zugang zum Internet oder einem praxisinternen Netzwerk benötigt. Zudem liefert der PC die Basis auf der die geeignete Software installiert wird, welche es dem Behandler erlaubt die elektronischen Daten als digitale Modelle zu betrachten und zu bearbeiten (7).

Die Erstellung digitaler Dateien durch einen Modellscanner beruht auf laser- und lichtoptischen Verfahren. In der Literatur kamen hierbei unterschiedliche Desktopscanner, wie der D700 3Shape, der Orapix 3D Scanner oder der Minolta VIVID 900 zur Anwendung. In dieser Studie wurde der orthoX[®] 3D - Modellscanner genutzt, welcher auf der Basis einer Streifenlichtprojektions - Technologie arbeitet. Dabei handelt es sich um ein Digitalisierungsverfahren welches nach dem Prinzip der aktiven Triangulation arbeitet. Kodierte Lichtstreifenmuster aus beleuchteten und unbeleuchteten Streifen werden auf das zu erfassende Objekt projiziert. Die durch das Objekt verformten Lichtstreifen werden in Abhängigkeit des verwendeten Systems durch eine oder mehrere Kameras erfasst. Da sich das Gipsmodell auf einem Drehteller befindet, werden Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln

erstellt. Durch aktive Triangulation soll nun die Tiefeninformation des zu erfassenden Objektes bestimmt werden. Das Grundprinzip besteht darin, einen Objektpunkt ausgehend von zwei bekannten Punkten anzupeilen. Dabei stellen die beiden bekannten Punkte die Kamera und die Lichtquelle dar. Aufgrund der Tatsache, dass Abstand und Winkel zwischen Kamera und Lichtquelle definiert sind, lässt sich ein Dreieck erstellen von dem alle Winkel sowie eine Seite bekannt sind. Die Position des Objektpunktes und somit des dritten Eckpunktes des Dreiecks kann dann berechnet werden. Durch Kombinieren der Abfolge heller und dunkler Streifen mit der jeweiligen Kameraaufnahme lassen sich die dreidimensionalen Koordinaten des Gipsmodells ermitteln (25)(26)(27).

2.5 Literaturübersicht

In der Literatur liegen zahlreiche Arbeiten zum Thema der computergestützten Modellauswertung vor. Die systematischen Übersichten einiger Autoren bestätigten die hohe Validität und Reliabilität der Methode (28)(29)(30). Hierbei zeigten die Gegenüberstellungen von digitalen und konventionellen Auswertungen an Gipsmodellen mehrheitlich keine signifikanten Unterschiede. Die im Rahmen der Reviews als statistisch signifikant gewerteten Differenzen waren im Durchschnitt kleiner 0,5 mm und konnten somit nach Ansicht der Autoren als klinisch irrelevant betrachtet werden. In den untersuchten Studien wurden die Systeme OrthoCad, emodel, C3D-builder, ConoProbe, Easy 3D Scan, Digimodels, Cecile 3, Ortho 3D Models, Geomagic, Biodent, Anatomodels, Cadent, Invivo Dental und Motionview getestet. Die in der vorliegenden Studie verwendete Auswertungssoftware OnyxCeph3TM (Image Instruments GmbH) wurde bereits durch Von der Wense untersucht und hinsichtlich ihrer Genauigkeit als vergleichbar präzise wie eine manuelle Ausmessung an herkömmlichen Gipsmodellen erachtet (31).

2.6 Ziele der Untersuchung

Während zahlreiche Publikationen die Validität und Reliabilität computergestützter Auswertungssysteme zur Modellanalyse untersuchten, bleibt die Fragestellung ob eine inklinierte Scanposition im Modellscanner Einfluss auf die Ergebnisse hat weiterhin offen. Ziel dieser Studie war es diese Frage zu beantworten und folgende Aspekte zu überprüfen:

- Ist die Vermessung von Gipsmodellen mit einem elektronischen Messschieber reproduzierbar?
- Ist die computergestützte Auswertung von Modellscans mit der OnyxCeph3TM - Software reproduzierbar?
- Ist die Reliabilität zwischen manueller und digitaler Methode vergleichbar?
- Ist die computergestützte Auswertung von Modellscans mit der OnyxCeph3TM- Software ebenso valide wie die konventionelle Vermessung von Gipsmodellen mit einem elektronischen Messschieber?
- Wirkt sich eine inklinierte Scanposition der Gipsmodelle im orthoX[®] 3D - Modellscanner auf die Ergebnisse aus? Besitzen eventuelle Unterschiede eine klinische Relevanz?

3 Material und Methode

3.1 Material

Für diese Studie wurden Modellpaare aus dem Patientengut der Klinik für Kieferorthopädie der Universität des Saarlandes, Deutschland ausgewählt.

Die Typ II - Gipsmodelle wurden nach der Trimmung nach Tränkmann von einem Zahntechniker dreidimensional getrimmt (32).

Folgende Einschlusskriterien wurden festgelegt:

- Angefertigte Modellpaare vor kieferorthopädischem Therapiebeginn
- Vollständig durchgebrochene zweite Dentition bis zum Sechsjahrmolaren
- Anwesenheit eines frontalen Engstandes
- Modellpaare frei von angeborenen Syndromen und Entwicklungsstörungen, welche eine physiologische Gebissentwicklung beeinflussen können
- Keine Modellbeschädigung oder fortgeschrittene Abrasion an den zu messenden Zähnen

Nach Prüfung der Einschlusskriterien wurden 47 Modellpaare für die Studie ausgewählt. Die Auswahl erfolgte unabhängig von Alter und Geschlecht. Drei Modellpaare wurden nachträglich aus dem Kollektiv entfernt, da diese im späteren Verlauf der Untersuchung, aufgrund eines Behandler- bzw. Ortswechsels, nicht mehr verfügbar waren. Das endgültige Studienkollektiv umfasste Modelpaare von 14 männlichen und 30 weiblichen Patienten.

3.2 Methode

3.2.1 Manuelle Messung

Zur manuellen Auswertung wurde ein digitaler Messschieber (HAMMACHER Solingen, HSL 246-15, Messgenauigkeit DIN 862) mit einer Messgenauigkeit von 1/100 mm verwendet. Die Ergebnisse wurden auf 1/10 mm gerundet.

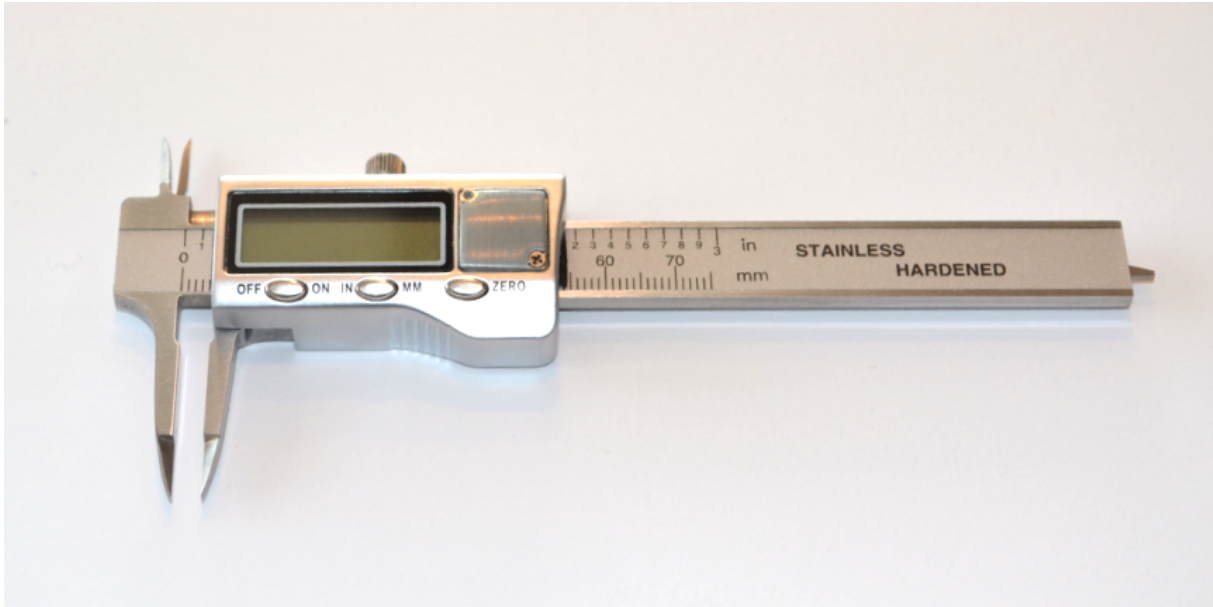


Abb. 2: Verwendeter digitaler Messschieber

Die manuelle Messung der Zahnbogenhöhe wurde mit einem handelsüblichen Geometriedreieck durchgeführt. Die Ergebnisse wurden auf 1/2 mm Genauigkeit abgelesen. Für alle Modelle wurden zu drei verschiedenen Zeitpunkten M 1, M 2, M 3 im wöchentlichen Intervall folgende Werte bestimmt: Irregularitätsindex, Zahnbogenbreiten, Zahnbogenhöhe und Zahnbreiten.

3.2.2 Digitale Messung

Alle Modelle wurden in drei unterschiedlichen Scanvorgängen digitalisiert. Die drei Datensätze wurden entsprechend des Scanvorganges in regelrecht (D_{Norm}), retroinkliniert (D_{Retro}) und anteinkliniert (D_{Ante}) unterteilt und in der Diagnostiksoftware Onyx Ceph® 3TM Version 3.2.14 (Image Instruments GmbH, Chemnitz, Deutschland) im Surface-Tessellation-Language (STL) Format gespeichert. Für das Scanverfahren wurde der orthoX® 3D-Modellscanner der Firma Dentauro verwendet, welcher die Streifenlichtprojektion als Scanmethode nutzt. Laut Hersteller wird hierbei eine Scangenaugkeit von $< 20 \mu\text{m}$ erreicht und eine Scanzeit pro Kiefer von 45 Sekunden benötigt (33). Nach separatem Scan des Ober- und Unterkiefers wurden beide Kiefer über den zugehörigen Quetschbiss verschlüsselt, am Modellhalter fixiert und gemeinsam erneut gescannt. Ein anschließender Matching-Prozess fügte die virtuellen Kiefer zusammen. Zur einheitlichen Ansicht wurden die Kiefer anhand der Raphe mediana in der Transversalebene und anhand der Okklusionsebene in der horizontalen Ebene ausgerichtet. Die Modellpaare wurden virtuell gesockelt und die fehlenden Weichteile errechnet. Verwendet wurde ein für den inklinierten Scanprozess eigens angefertigter Holzkeil (Länge: 42 mm,

Breite: 42 mm, distale Höhe: 6 mm) (Abb. 3), um einen konstanten Neigungswinkel von 7° in retroinklinierter bzw. anteinklinierter Modellposition zu gewährleisten (Abb. 4). Der Unterschied zwischen dem Anteinklinations - und Retroinklinationsscan wurde durch eine Drehung des Keiles um 180° gewährleistet.



Abb. 3: Holzkeil für die inklinierten Scanprozesse

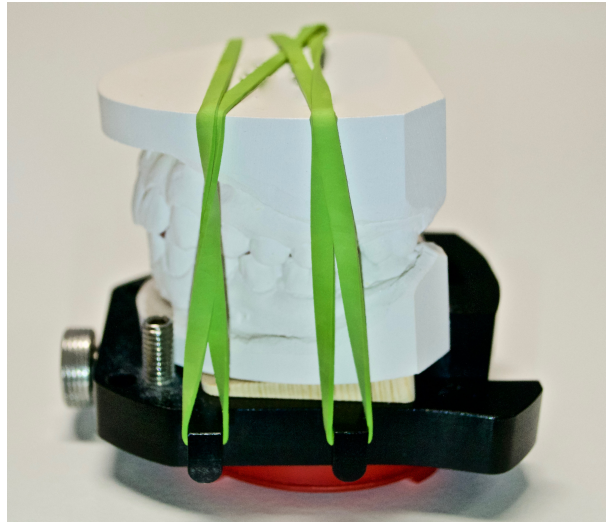


Abb. 4 Position des Holzkeiles für einen retroinklinierten Scan in Okklusion

Im Rahmen der digitalen Messung wurden zu zwei verschiedenen Zeitpunkten die gleichen Parameter wie bei der manuellen Messung erhoben: Irregularitätsindex, Zahnbogenbreiten, Zahnbogenhöhe und Zahnbreiten. Digitale Messpunkte mussten gesetzt werden, um die gewünschten Strecken auswerten zu können. Hierbei kam das Analyseverfahren „Homburg_II_2016“ zur Anwendung, welches eigens für diese Studie entwickelt wurde. Die virtuellen Modelle durften während der Auswertung am Bildschirm rotiert und mittels der Zoom-Funktion vergrößert werden. Die errechneten Werte wurden in Tabellenform als PDF-Datei gespeichert und auf eine Dezimalstelle gerundet.

3.2.3 Erhobene Parameter

Irregularitätsindex (II)

Zur Bestimmung des anterioren Engstandes wurde der Little Irregularitätsindex bestimmt. Hierbei wurden die labiolingualen Kontaktpunktabweichungen zwischen den Zähnen 33 bis 43 bestimmt. Aus der Summe der Einzelwerte ergibt sich der Little Irregularitätsindex. Der Messschieber wurde möglichst parallel zur Okklusionsebene gehalten, um vertikale Abweichungen der Kontaktpunkte nicht zu erfassen.

Obwohl Little (1975) seine Methode für den Unterkiefer beschrieb, wurde in dieser Studie der Index auch für den Oberkiefer angewandt.

Im Unterkiefer wurden die Einzelwerte II33/32, II32/31, II31/41, II41/42, II42/43, im Oberkiefer die Einzelwerte II13/12, II12/11, II11/21, II21/22, II22/23 erfasst.

Die Einteilung in Littles Irregularitätsindex erfolgt in Schweregrade von 0 - 10 (mm):

0	-	idealer Zahnbogen
1 - 3	-	geringe Zahnfehlstellung
4 - 6	-	moderate Zahnfehlstellung
7 - 9	-	starke Zahnfehlstellung
> 10	-	sehr starke Zahnfehlstellung

Vordere und hintere Zahnbogenbreite (vZBB/hZBB)

Die vordere Zahnbogenbreite im Oberkiefer wurde bestimmt durch die Distanz zwischen der Mitte der Hauptfissur des ersten rechten Prämolaren und der Mitte der Hauptfissur des ersten linken Prämolaren.

Die hintere Zahnbogenbreite im Oberkiefer wurde bestimmt durch die Distanz zwischen dem Schnittpunkt der Querrfissur mit der nach bukkal auslaufenden Fissur des Zahnes 16 und dem Schnittpunkt der Querrfissur mit der nach bukkal auslaufenden Fissur des Zahnes 26.

Die vordere Zahnbogenbreite im Unterkiefer wurde ermittelt durch die Strecke zwischen dem vestibulären distalen Kontaktpunkt des ersten unteren linken Prämolaren und dem vestibulären distalen Kontaktpunkt des ersten unteren rechten Prämolaren.

Die hintere Zahnbogenbreite im Unterkiefer wurde ermittelt durch die Strecke zwischen der mediobukkalen (bei fünf-höckerigem Zahn) oder distobukkalen (bei vier-höckerigem Zahn) Höckerspitze des Zahnes 36 und der mediobukkalen (bei fünf-höckerigem Zahn) oder distobukkalen (bei vier-höckerigem Zahn) Höckerspitze des Zahnes 46.

Zahnbogenhöhe im Oberkiefer bzw. im Unterkiefer (LO/LU)

Die Zahnbogenhöhe im Oberkiefer stellt die kürzeste Distanz zwischen der Labialfläche des am weitesten labial stehenden oberen mittleren Inzisivus und dem Schnittpunkt der vorderen Zahnbogenbreite dar.

Die Zahnbogenhöhe im Unterkiefer ergibt sich aus der kürzesten Distanz zwischen der Labialfläche des am weitesten labial stehenden unteren mittleren Inzisivus und dem Schnittpunkt der vorderen Zahnbogenbreite.

Zahnbreiten (ZB)

Die Strecke zwischen dem mesialen und distalen Punkt des größten mesiodistalen Kronendurchmessers des entsprechenden Zahnes ergibt die Zahnbreite.

Im Oberkiefer wurden die Zahnbreiten der Zähne 16, 11, 22 und 24, im Unterkiefer die Zahnbreiten der Zähne 35, 32, 41 und 46 ermittelt.

3.3 Statistische Analyse

Die gespeicherten Daten der untersuchten Variablen wurden in Mikrossoft® Office Excel 2016 übertragen und anschließend in das Programm SPSS Statistics für Mac OS (Version 23.0.0.2, SPSS Inc., Chicago, USA) importiert und ausgewertet. Alle Datensätze wurden zunächst grafisch über Balkendiagramme dargestellt und auf ihre Normalverteilung geprüft. War diese gegeben, wurden die statistischen Untersuchungen mittels einfaktorieller Varianzanalyse oder dem t-Test für verbundene Stichproben durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde auf dem Niveau von $p < 0,05$ zweiseitig festgelegt.

3.3.1 Gegenüberstellung der digitalen Scangruppen

Für einen Vergleich der drei unterschiedlichen Scangruppen (regelrecht, retroinkliniert, anteinkliniert) wurden die geprüften Parameter in drei Gruppen unterteilt (Tab. 2).

	Oberkiefer	Unterkiefer
Irregularitätsindex (II)	II13/12, II12/11, II11/21, II21/22, II22/23	II33/32, II32/31, II 31/41, II41/42, II42/43
Längen (L)	vZBBo, hZBBo, LO	vZBBu, hZBBu, LU
Zahnbreiten (ZB)	16, 11, 22, 24	35, 32, 41, 46

Tab. 1: Unterteilung der geprüften Parameter in drei Gruppen

Im Rahmen der statistischen Analyse wurden zunächst die Gruppen Little Irregularitätsindex (II), Länge (L) und Zahnbreiten (ZB) der Scangruppen D_{Norm} , D_{Retro} und D_{Ante} mittels einfaktorieller Varianzanalyse (ANOVA) geprüft. Sofern statistisch signifikanten Unterschiede festgestellt wurden, kam der t - Test zur Anwendung, um die Zusammenhänge näher zu untersuchen.

3.3.2 Vergleich zwischen manueller und digitaler Auswertung

Der Vergleich zwischen manueller und digitaler Messung in regelrechter Modellposition zu unterschiedlichen Zeitpunkten (M2 / M3, $D_{\text{Norm 1}}$ / $D_{\text{Norm 2}}$) wurde in Abb. 5 veranschaulicht. Die untersuchten Parameter beziehen sich ebenfalls auf die in Tab. 2 aufgelisteten Gruppen. Ein t-Test für verbundene Stichproben wurde angewandt, um statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Differenzen der Mittelwerte zu ermitteln.

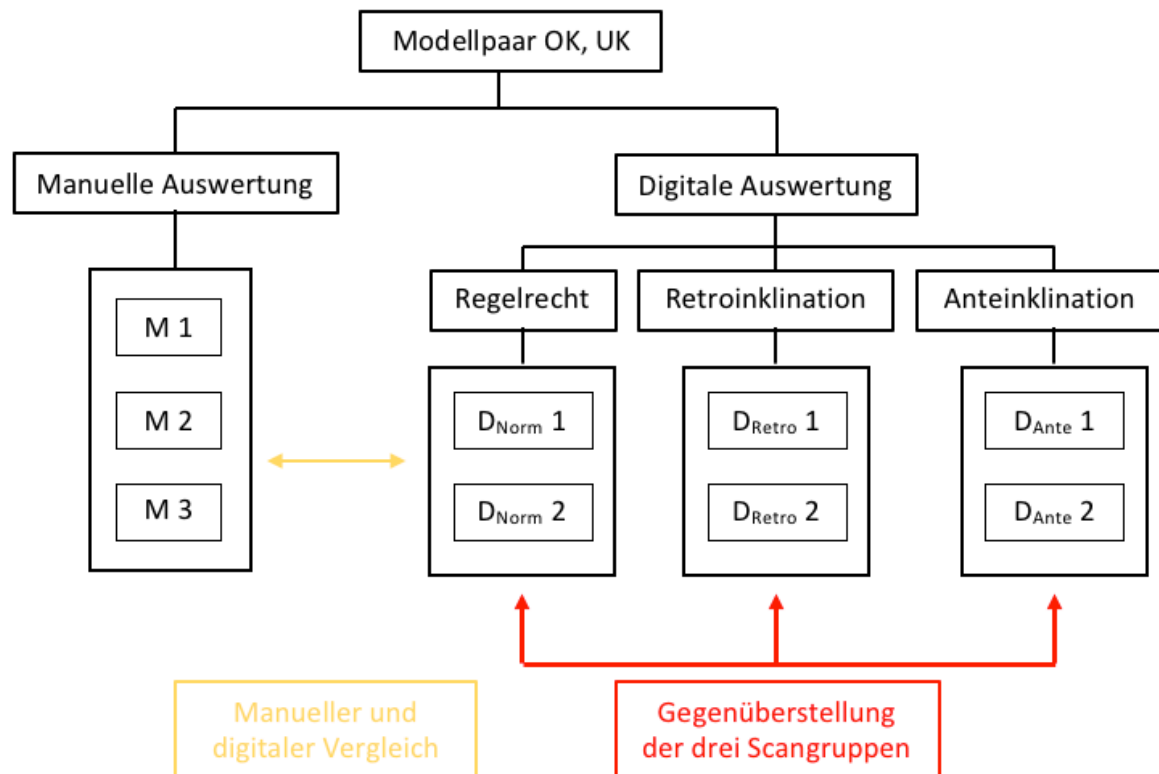


Abb. 5: Grafischer Überblick der Auswertungen. Die Pfeile beschreiben die durchgeführten Vergleiche. Die arabischen Zahlen geben die verschiedenen Zeitpunkte der Messungen wieder.

3.4 Intraraterreliabilität

3.4.1 Manuelle Messwiederholung

In der Gegenüberstellung der manuellen Messungen zu den drei verschiedenen Zeitpunkten (M1, M2, M3) (Abb. 6) wurden die Werte mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) untersucht und auf statistisch signifikante Differenzen überprüft. Bei statistisch signifikanten Differenzen, wurde für jede der drei Kombinationen ein t-Test für verbundene Stichproben durchgeführt.

3.4.2 Digitale Messwiederholung

In der Gegenüberstellung der digitalen Scangruppen zu den zwei verschiedenen Zeitpunkten ($D_{\text{Norm 1}} / D_{\text{Norm 2}}$, $D_{\text{Retro 1}} / D_{\text{Retro 2}}$, $D_{\text{Ante 1}} / D_{\text{Ante 2}}$) (Abb. 6) wurde ein t-Test für verbundene Stichproben durchgeführt, um statistisch relevante Unterschiede aus den Differenzen der Mittelwerte hervorzuheben.

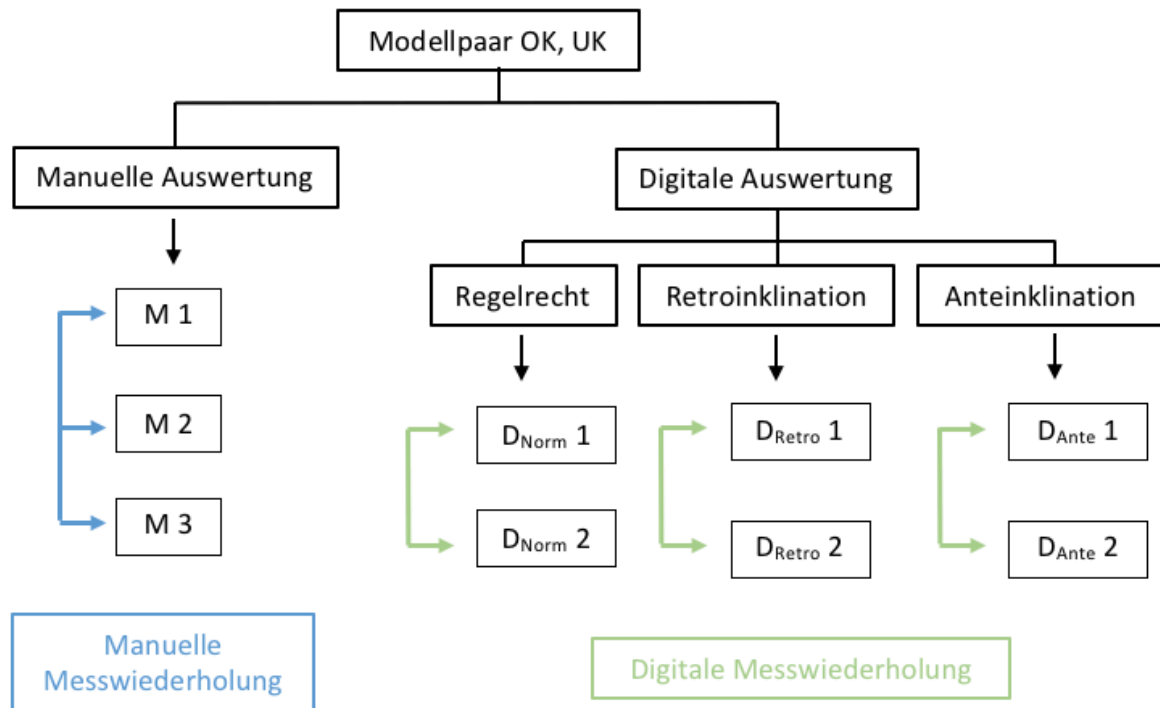


Abb. 6: Grafischer Überblick der Auswertungen. Die Pfeile beschreiben die durchgeführten Vergleiche. Die arabischen Zahlen geben die verschiedenen Zeitpunkte der Messungen wieder.

3.5 Grafische Darstellung im Bland-Altman-Diagramm

Alle durchgeführten Vergleiche wurden grafisch über das Bland-Altman-Diagramm dargestellt (Abb. 7).

Dem Graphen sind Schwankungsbreite sowie Ausreißer zu entnehmen. Systematische Messfehler lassen sich anhand dieser grafischen Darstellung leichter erkennen (34). Der Mittelwert wird auf der X-Achse gegen die Differenz auf der Y-Achse eingetragen. Zusätzlich sind drei Geraden parallel zur Abszisse abgebildet. Die blaue Gerade bezeichnet den Mittelwert (MW) der Differenz. Die Übereinstimmungsgrenzen (Limits of agreement) sind rot abgebildet.

Die Obergrenze berechnet sich aus dem Mittelwert der Differenz plus 1,96 multipliziert mit der Standardabweichung der Differenz. Die Untergrenze errechnet sich aus dem Mittelwert der Differenz minus 1,96 multipliziert mit der Standardabweichung der Differenz. Insofern eine normale symmetrische Verteilung der Differenzen gegeben ist, befinden sich 95% der Werte im Feld der Übereinstimmungsgrenzen.

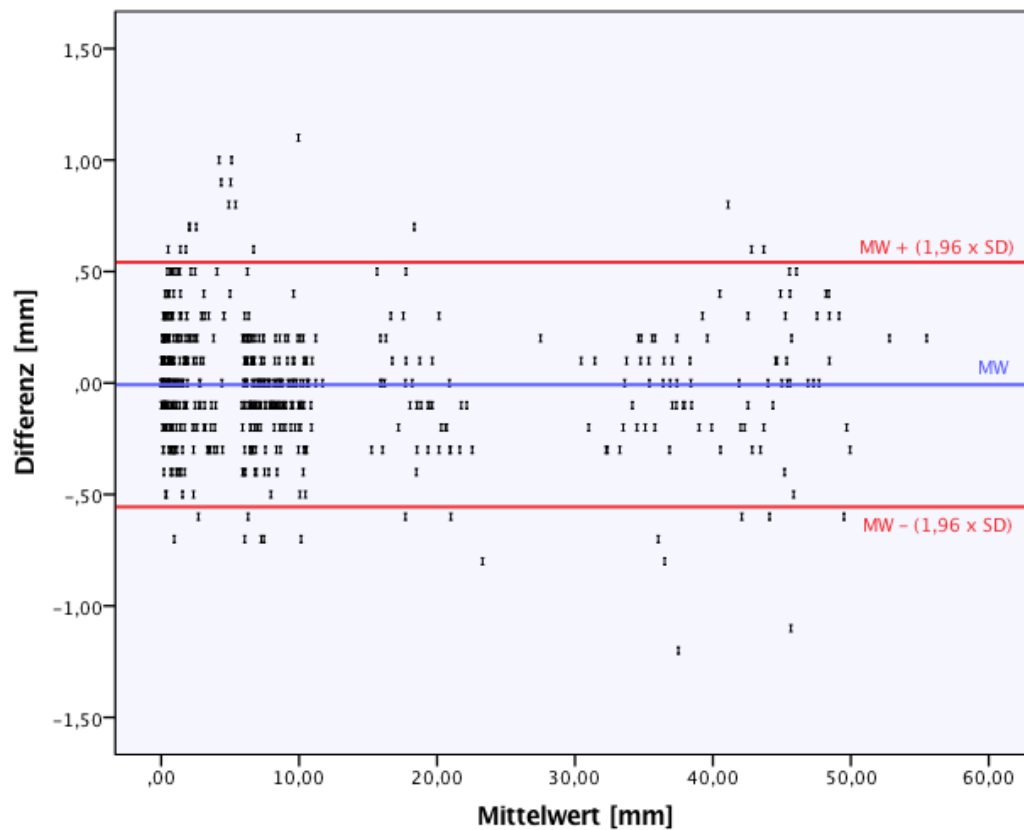


Abb. 7: Beispiel eines Bland-Altman-Diagrammes

4 Ergebnisse

Insgesamt wurden 44 Modellpaare für die vorliegende Studie ausgewertet. Die Messwerte sind in Bland-Altman-Diagrammen dargestellt und können dem Anhang entnommen werden. Die Ergebnisse der statistischen Untersuchung sind in den Tabellen 3-20 aufgeführt.

4.1 Gegenüberstellung der digitalen Scangruppen

Nach Auswertung der einfaktoriellen Varianzanalyse konnten für die Gruppen II und ZB statistisch signifikante Unterschiede im Oberkiefer beobachtet werden. Der Unterkiefer unterschied sich statistisch signifikant in den Gruppen - L und ZB (Tab. 3).

Einfaktorielle Varianzanalyse der Gruppen D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante}				
		Mauchly-Test auf Sphärizität	Sphärizität angenommen	Korrektur nach Greenhouse Geisser
OK	Irregularitätsindex (II)	<0,001	Nein	<0,001
	Längen (L)	<0,001	Nein	0,104
	Zahnbreiten (ZB)	<0,001	Nein	<0,001
UK	Irregularitätsindex (II)	<0,001	Nein	0,369
	Längen (L)	<0,001	Nein	<0,001
	Zahnbreiten (ZB)	0,002	Nein	<0,001

Tab. 2: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der digitalen Scangruppen

Die Einzelvergleiche mittels t-Test im Oberkiefer unterschieden sich statistisch signifikant für die Gruppe L zwischen dem Paar $D_{\text{Norm}} / D_{\text{Ante}}$ zum Messzeitpunkt 2. Die Gruppe II zeigte statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Paaren $D_{\text{Retro}} / D_{\text{Ante}}$ und $D_{\text{Norm}} / D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 1 und 2. Bei der Auswertung der Gruppe ZB ließen sich statistisch signifikante Unterschiede für die Vergleiche $D_{\text{Norm}} / D_{\text{Retro}}$, $D_{\text{Norm}} / D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 1 und $D_{\text{Retro}} / D_{\text{Ante}}$, $D_{\text{Norm}} / D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 2 beobachten (Tab. 4 - 6).

t-Tests - Little Irregularitätsindex - D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante} im Oberkiefer						
		Mittelwert	Standard-abweichung	95% Konfidenzintervall		p - Wert
				Untere	Obere	
OK Zeitpunkt 1	$D_{\text{Norm}} 1. \text{ II} - D_{\text{Retro}} 1 \text{ II}$,0366	,3485	-,0056	,0788	,089
	$D_{\text{Retro}} 1. \text{ II} - D_{\text{Ante}} 1 \text{ II}$,0513	,3596	,0077	,0949	,021
	$D_{\text{Norm}} 1. \text{ II} - D_{\text{Ante}} 1 \text{ II}$,0879	,4578	,0324	,1434	,002
OK Zeitpunkt 2	$D_{\text{Norm}} 2. \text{ II} - D_{\text{Retro}} 2 \text{ II}$,0189	,3076	-,0183	,0562	,318
	$D_{\text{Retro}} 2. \text{ II} - D_{\text{Ante}} 2 \text{ II}$,0386	,3012	,0021	,0751	,038
	$D_{\text{Norm}} 2. \text{ II} - D_{\text{Ante}} 2 \text{ II}$,0576	,3323	,0173	,0978	,005

Tab. 3: Ergebnisse der t-Tests für die Gruppe Irregularitätsindex (II) im Oberkiefer

t-Tests - Längen - D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante} im Oberkiefer						
		Mittelwert	Standard-abweichung	95% Konfidenzintervall		p - Wert
				Untere	Obere	
OK Zeitpunkt 1	$D_{\text{Norm}} 1. \text{ L} - D_{\text{Retro}} 1. \text{ L}$,0670	,4849	-,0165	,1505	,115
	$D_{\text{Retro}} 1. \text{ L} - D_{\text{Ante}} 1. \text{ L}$	-,0056	,4945	-,0908	,0795	,897
	$D_{\text{Norm}} 1. \text{ L} - D_{\text{Ante}} 1. \text{ L}$,0614	,5477	-,0329	,1557	,200
OK Zeitpunkt 2	$D_{\text{Norm}} 2. \text{ L} - D_{\text{Retro}} 2. \text{ L}$	-,0409	,3696	-,1046	,0227	,206
	$D_{\text{Retro}} 2. \text{ L} - D_{\text{Ante}} 2. \text{ L}$	-,0402	,3266	-,0964	,0161	,160
	$D_{\text{Norm}} 2. \text{ L} - D_{\text{Ante}} 2. \text{ L}$	-,0811	,3682	-,1445	-,0177	,013

Tab. 4: Ergebnisse der t-Tests für die Gruppe Längen (L) im Oberkiefer

t-Tests - Zahnbreiten - D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante} im Oberkiefer						
		Mittelwert	Standard-abweichung	95% Konfidenzintervall		p - Wert
				Untere	Obere	
OK Zeitpunkt 1	$D_{\text{Norm}} 1 \text{ ZB} - D_{\text{Retro}} 1 \text{ ZB}$	-,0875	,2277	-,1214	-,0536	,000
	$D_{\text{Retro}} 1 \text{ ZB} - D_{\text{Ante}} 1 \text{ ZB}$	-,0017	,2171	-,0340	,0306	,917
	$D_{\text{Norm}} 1 \text{ ZB} - D_{\text{Ante}} 1 \text{ ZB}$	-,0892	,2441	-,1255	-,0529	,000
OK Zeitpunkt 2	$D_{\text{Norm}} 2 \text{ ZB} - D_{\text{Retro}} 2 \text{ ZB}$	-,0136	,1681	-,0386	,0114	,283
	$D_{\text{Retro}} 2 \text{ ZB} - D_{\text{Ante}} 2 \text{ ZB}$	-,0517	,1833	-,0790	-,0244	,000
	$D_{\text{Norm}} 2 \text{ ZB} - D_{\text{Ante}} 2 \text{ ZB}$	-,0653	,1817	-,0924	-,0383	,000

Tab. 5: Ergebnisse der t-Tests für die Gruppe Zahnbreiten (ZB) im Oberkiefer

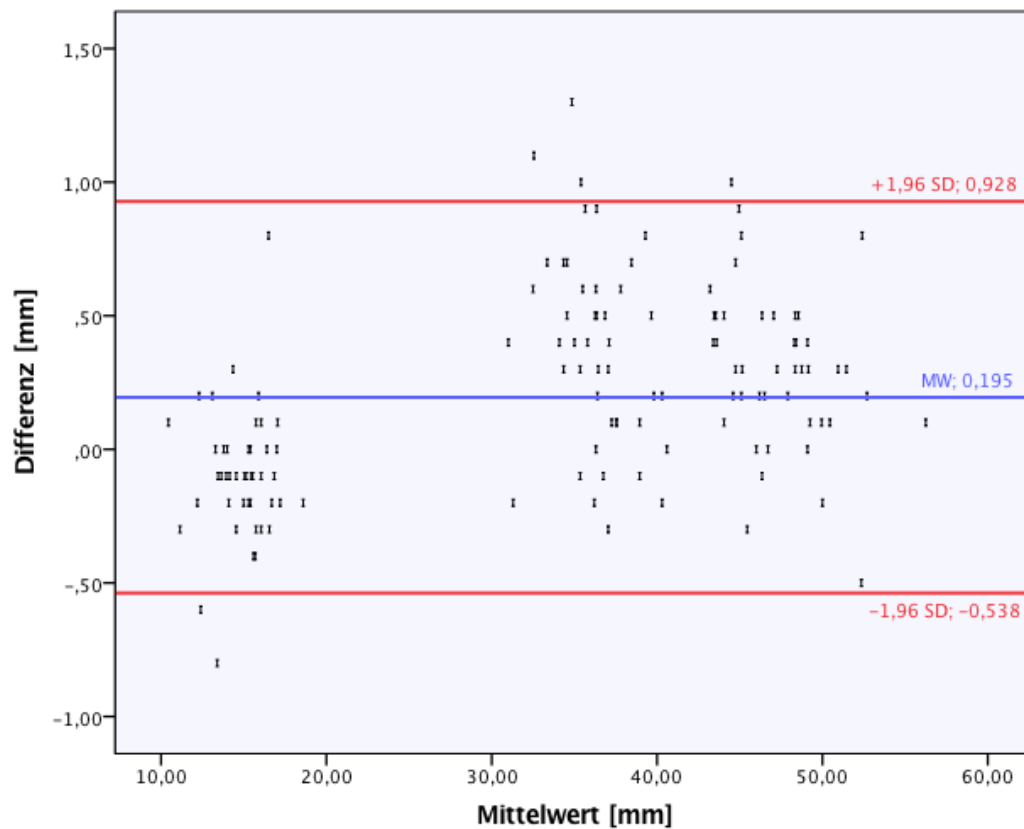
Die Einzelvergleiche der Scangruppen mittels t-Tests im Unterkiefer ergab statistisch signifikante Unterschiede für alle Vergleiche der Gruppe L, mit Ausschluss des Paares $D_{\text{Norm}} / D_{\text{Retro}}$ zum Zeitpunkt 2. Die größte Differenz wurde bei der Gegenüberstellung $D_{\text{Norm}} / D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 1 mit einem Wert von 0,195mm gemessen. Die Ergebnisse wurden grafisch unter Abb. 8 veranschaulicht. Der Vergleich der Gruppe II unterschied sich statistisch signifikant für die Gegenüberstellung $D_{\text{Retro}} / D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 2. Die Auswertung der Gruppe ZB wies mehrheitlich statistisch signifikante Unterschiede auf. Eine Ausnahme stellte hierbei der Vergleich zwischen $D_{\text{Norm}} / D_{\text{Retro}}$ zum Zeitpunkt 2 dar (Tab. 7 - 9).

t-Tests - Little Irregularitätsindex - D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante} im Unterkiefer						
		Mittelwert	Standard-abweichung	95% Konfidenzintervall		p - Wert
				Untere	Obere	
UK Zeitpunkt 1	$D_{\text{Norm}} 1 \text{ II} - D_{\text{Retro}} 1 \text{ II}$,0152	,2912	-,0201	,0504	,399
	$D_{\text{Retro}} 1 \text{ II} - D_{\text{Ante}} 1 \text{ II}$	-,0083	,2991	-,0446	,0279	,651
	$D_{\text{Norm}} 1 \text{ II} - D_{\text{Ante}} 1 \text{ II}$,0068	,2537	-,0239	,0376	,663
UK Zeitpunkt 2	$D_{\text{Norm}} 2 \text{ II} - D_{\text{Retro}} 2 \text{ II}$	-,0225	,2549	-,0534	,0084	,153
	$D_{\text{Retro}} 2 \text{ II} - D_{\text{Ante}} 2 \text{ II}$,0364	,2475	,0064	,0664	,018
	$D_{\text{Norm}} 2 \text{ II} - D_{\text{Ante}} 2 \text{ II}$,0139	,3215	-,0251	,0528	,484

Tab. 6: Ergebnisse der t-Tests für die Gruppe Irregularitätsindex (II) im Unterkiefer

t-Tests - Längen - D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante} im Unterkiefer						
		Mittelwert	Standard-abweichung	95% Konfidenzintervall		p - Wert
				Untere	Obere	
UK Zeitpunkt 1	$D_{\text{Norm}} 1. \text{ L} - D_{\text{Retro}} 1. \text{ L}$,1212	,2914	,0710	,1714	,000
	$D_{\text{Retro}} 1. \text{ L} - D_{\text{Ante}} 1. \text{ L}$,0735	,2978	,0222	,1248	,005
	$D_{\text{Norm}} 1. \text{ L} - D_{\text{Ante}} 1. \text{ L}$,1947	,3742	,1303	,2591	,000
UK Zeitpunkt 2	$D_{\text{Norm}} 2. \text{ L} - D_{\text{Retro}} 2. \text{ L}$	-,0326	,2611	-,0775	,0124	,154
	$D_{\text{Retro}} 2. \text{ L} - D_{\text{Ante}} 2. \text{ L}$	-,0576	,2624	-,1028	-,0124	,013
	$D_{\text{Norm}} 2. \text{ L} - D_{\text{Ante}} 2. \text{ L}$	-,0902	,2804	-,1384	-,0419	,000

Tab. 7: Ergebnisse der t-Tests für die Gruppe Längen (L) im Unterkiefer

Abb. 8: Bland-Altman-Diagramm: Unterkiefer; Längen, $D_{\text{Norm}}/D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 1

t-Tests - Zahnbreiten - D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante} im Unterkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall		p - Wert
				Untere	Obere	
UK Zeitpunkt 1	$D_{\text{Norm}} 1 \text{ ZB} - D_{\text{Retro}} 1 \text{ ZB}$	-,0347	,1785	-,0612	-,0081	,011
	$D_{\text{Retro}} 1 \text{ ZB} - D_{\text{Ante}} 1 \text{ ZB}$	-,0403	,1789	-,0670	-,0137	,003
	$D_{\text{Norm}} 1 \text{ ZB} - D_{\text{Ante}} 1 \text{ ZB}$	-,0750	,2030	-,1052	-,0448	,000
UK Zeitpunkt 2	$D_{\text{Norm}} 2 \text{ ZB} - D_{\text{Retro}} 2 \text{ ZB}$,0011	,1724	-,0245	,0268	,930
	$D_{\text{Retro}} 2 \text{ ZB} - D_{\text{Ante}} 2 \text{ ZB}$	-,0523	,1519	-,0749	-,0297	,000
	$D_{\text{Norm}} 2 \text{ ZB} - D_{\text{Ante}} 2 \text{ ZB}$	-,0511	,1649	-,0757	-,0266	,000

Tab. 8: Ergebnisse der t-Tests für die Gruppe Zahnbreiten (ZB) im Unterkiefer

4.2 Vergleich zwischen manueller und digitaler Auswertung

Bei den Auswertungen der t-Tests konnten statistisch signifikante Unterschiede für den Oberkiefer zwischen $D_{\text{Norm}} 1 / \text{M2}$ der Gruppe L, $D_{\text{Norm}} 1 / \text{M2}$ und $D_{\text{Norm}} 2 / \text{M3}$ der Gruppe II, $D_{\text{Norm}} 1 / \text{M2}$ und $D_{\text{Norm}} 2 / \text{M3}$ der Gruppe ZB ermittelt werden (Tab. 10 - 12).

t-Tests - Little Irregularitätsindex - manueller und digitaler Vergleich im Oberkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall der		p - Wert
				Untere	Obere	
OK	D _{Norm} 1 II - M2 II	-,2702	,5821	-,3408	-,1997	,000
	D _{Norm} 2 II - M3 II	-,2962	,7005	-,3811	-,2113	,000

Tab. 9: Ergebnisse der t-Tests zwischen manuellem und digitalem Vergleich für die Gruppe Irregularitätsindex (II) im Oberkiefer

t-Tests - Längen - manueller und digitaler Vergleich im Oberkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall der		p - Wert
				Untere	Obere	
OK	D _{Norm} 1 L - M2 L	,0980	,5481	,0037	,1924	,042
	D _{Norm} 2 L - M3 L	,0000	,5373	-,0925	,0925	1,000

Tab. 10: Ergebnisse der t-Tests zwischen manuellem und digitalem Vergleich für die Gruppe Längen (L) im Oberkiefer

t-Tests - Zahnbreiten - manueller und digitaler Vergleich im Oberkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall der		p - Wert
				Untere	Obere	
OK	D _{Norm} 1 ZB - M2 ZB	-,2343	,2503	-,2715	-,1970	,000
	D _{Norm} 2 ZB - M3 ZB	-,1989	,2308	-,2332	-,1645	,000

Tab. 11: Ergebnisse der t-Tests zwischen manuellem und digitalem Vergleich für die Gruppe Zahnbreiten (ZB) im Oberkiefer

Der Unterkiefer unterschied sich statistisch signifikant im Vergleichen zwischen $D_{\text{Norm 1}} / M2$, $D_{\text{Norm 2}} / M3$ der Gruppe II und $D_{\text{Norm 1}} / M2$, $D_{\text{Norm 2}} / M3$ der Gruppe ZB (Tab. 13-15).

t-Tests - Little Irregularitätsindex - manueller und digitaler Vergleich im Unterkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall der		p - Wert
				Untere	Obere	
UK	D _{Norm 1 II} - M2 II	-,2384	,5853	-,3093	-,1675	,000
	D _{Norm 2 II} - M3 II	-,2490	,6451	-,3272	-,1708	,000

Tab. 12: Ergebnisse der t-Tests des manuell / digitalen Vergleichs für die Gruppe Irregularitätsindex (II) im Unterkiefer

t-Tests - Längen - manueller und digitaler Vergleich im Unterkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall der		p - Wert
				Untere	Obere	
UK	D _{Norm 1 L} - M2 L	,0317	,6542	-,0810	,1443	,579
	D _{Norm 2 L} - M3 L	-,0818	,5861	-,1827	,0191	,111

Tab. 13: Ergebnisse der t-Tests des manuell / digitalen Vergleichs für die Gruppe Längen (L) im Unterkiefer

t-Tests - Zahnbreiten - manueller und digitaler Vergleich im Unterkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall der		p - Wert
				Untere	Obere	
UK	D _{Norm 1 ZB} - M2 ZB	-,1635	,2220	-,1965	-,1304	,000
	D _{Norm 2 ZB} - M3 ZB	-,0364	,1901	-,0647	-,0081	,012

Tab. 14: Ergebnisse der t-Tests des manuell / digitalen Vergleichs für die Gruppe Zahnbreiten (ZB) im Unterkiefer

4.3 Ergebnisse der Messwiederholung der digitalen Auswertung der drei Scangruppen

Die Analyse der wiederholten Messungen der Modellpaare D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante} durch die t-Tests ergab statistisch signifikante Unterschiede zwischen der retroinklinierten und anteinklinierten Modellposition im Unterkiefer (Tab. 16 - 17).

t-Tests - Messwiederholung - D _{Norm} , D _{Retro} , D _{Ante} im Oberkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall		p - Wert
				Untere	Obere	
OK	D _{Norm} 1 - D _{Norm} 2	,0152	,3708	-,0152	,0457	,327
	D _{Retro} 1 - D _{Retro} 2	,0049	,3000	-,0197	,0295	,696
	D _{Ante} 1 - D _{Ante} 2	-,0243	,3499	-,0530	,0044	,097

Tab. 15: Ergebnisse der t-Tests für die wiederholten Messungen der Modellpaare D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante} im Oberkiefer

t-Tests - Messwiederholung - D _{Norm} , D _{Retro} , D _{Ante} im Unterkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall		p - Wert
				Untere	Obere	
UK	D _{Norm} 1 - D _{Norm} 2	,0069	,2897	-,0169	,0307	,570
	D _{Retro} 1 - D _{Retro} 2	-,0350	,2538	-,0558	-,0141	,001
	D _{Ante} 1 - D _{Ante} 2	-,0483	,2575	-,0694	-,0271	,000

Tab. 16: Ergebnisse der t-Tests für die wiederholten Messungen der Modellpaare D_{Norm} , D_{Retro} , D_{Ante} im Unterkiefer

4.4 Ergebnisse der Messwiederholung der manuellen Auswertung

Die Evaluation der einfaktoriellen Varianzanalyse für die wiederholten manuellen Messungen ergab statistisch signifikante Unterschiede für Ober - und Unterkiefer (Tab. 18).

Einfaktorielle Varianzanalyse der manuellen Messwiederholung				
		Mauchly-Test auf Sphärizität	Sphärizität angenommen	Korrektur nach Greenhouse Geisser
OK	M1 - M2 - M3	<,001	Nein	,021
UK	M1 - M2 - M3	<,001	Nein	<,001

Tab. 17: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) für die manuelle Messwiederholung im Ober - und im Unterkiefer

Der daraufhin angewandte t-Test verdeutlichte statistisch signifikant Unterschiede im Oberkiefer zwischen den Zeitpunkten 1 und 2 (Tab. 19).

t-Test - manuelle Messwiederholung im Oberkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall der		p - Wert
				Untere	Obere	
OK	M1 - M2	,0359	,3105	,0104	,0614	,006
	M2 - M3	-,0085	,2983	-,0330	,0160	,495
	M1 - M3	,0274	,3472	-,0012	,0559	,060

Tab. 18: Ergebnisse der t-Tests für die manuellen Messwiederholungen im Oberkiefer

Im Unterkiefers konnten ebenfalls statistisch signifikante Unterschiede im Vergleich der Messwerte zu den Zeitpunkten 1 und 2, sowie 1 und 3 ermittelt werden (Tab. 20).

t-Test - manuelle Messwiederholung im Unterkiefer						
		Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall der		p - Wert
				Untere	Obere	
UK	M1 - M2	,0483	,2634	,0267	,0700	,000
	M2 - M3	,0149	,2424	-,0050	,0348	,142
	M1 - M3	,0633	,2872	,0397	,0868	,000

Tab. 19: Ergebnisse der t-Tests für die manuellen Messwiederholungen im Unterkiefer

5 Diskussion

5.1 Material und Methode

5.1.1 Modellpaare

Die Selektion der Modelle erfolgte anonymisiert und randomisiert aus dem Patientengut der Klinik für Kieferorthopädie der Universität des Saarlandes. Die Selektion erfolgte unabhängig von Alter und Geschlecht, da diese beiden Merkmale unerheblich für die Fragestellung der Untersuchung waren.

Ungenauigkeiten aufgrund von Volumenänderungen, bedingt durch die Abbinde Reaktion nach der Herstellung der Gipsmodelle können ausgeschlossen werden, da das zeitliche Intervall zwischen Herstellung und manueller Auswertung bzw. digitalem Scanvorgang mindestens 15 Wochen betrug. Laut den Ergebnissen von Michalakakis et al., ist die anfängliche Expansion des Gipses nach 96 Stunden beendet (35). Ein Schrumpfen des Werkstoffes kann bis 2 Wochen nach dem Ausgießen beobachtet werden (36).

Da sich in dieser Studie beide Messmethoden auf dieselben Modelle beziehen, entfällt die Anfertigung mehrerer Alginatabformungen. Schrumpfung oder Expansion von Abformungen wie sie von Quimby et al. und Santoro et al. als mögliche Fehlerquellen beschrieben werden, sind somit für diese Studie nicht von Bedeutung (6)(37).

5.1.2 Manuelle und digitale Auswertung

Eine Alternative zur manuellen Messung mithilfe des digitalen Messschiebers bietet der Stechzirkel. Studien von Hunter und Priest und Shellart et al. kommen zu dem Ergebnis, dass die Verwendung eines Stechzirkels im Mittel zu größeren Messwerten führt als ein Messschieber (38)(39). Hunter und Priest begründen dieses Verhalten dadurch, dass aufgrund der konisch zulaufenden Spitzen des Messzirkels vielmehr die Schenkel der Messnadeln, als deren Spitzen in Berührung mit den Kontaktpunkten der Zähne kommen. Aufgrund dieser Beobachtungen kam in dieser Studie ein digitaler Messschieber zur Anwendung.

Eine mögliche Fehlerquelle des digitalen Messschiebers ist die Handhabung. Trotz feingliedriger Gestaltung der Messspitzen ist es nicht immer möglich den gewünschten Messpunkt zu erfassen. Gründe hierfür können Bereiche im Unterschnitt oder sich überlagernde Strukturen sein. In solchen Fällen sind die Spitzen der Messlehre nicht punktgenau zu platzieren und dies kann zu Ungenauigkeiten der Werte führen. Anfängliche Schwierigkeiten beim

Messen und ein verändertes Setzen der Referenzpunkte durch Lernprozesse können die Ergebnisse weiterhin beeinflussen. Um letztere Fehlerquellen zu minimieren, wurden sowohl die manuellen, als auch die digitalen Messungen trainiert. Ungeachtet des Übungsstandes ist davon auszugehen, dass Untersucher mit einem routinierten Erfahrungspotential im Umgang mit den beschriebenen Methoden homogenere Messwerte erzielen. Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kamen auch andere Autoren (40)(41)(42). Eine Trainingssoftware zur Schulung unerfahrener Untersucher zu Steigerung der Vertrautheit mit dem verwendeten Auswertungsprogramm zu steigern, wird 2005 in der Publikation von Mayers et al. als mögliche Lösung beschrieben (43).

Obwohl Little 1975 seine Methode des Little Irregularitätsindex für den Unterkiefer beschrieb, wurde in dieser Studie der Index erweitert und auch für den Oberkiefer angewandt. Dies entspricht einer Nutzung, die auch in anderen Publikationen beschrieben wird (42)(44)(45)(46)(47).

Die Schwierigkeit der digitalen Auswertung liegt in der korrekten Identifikation der Messpunkte (28). Überlagernde Strukturen oder unklare Abgrenzungen beeinträchtigen die Messpunktlokalisation (48). Watanabe et al. machten 2009 die Beobachtung, dass Überlagerungen von Strukturen beim Scanprozess zu Schatten führen können, welche bei der späteren Auswertung in Ungenauigkeiten resultieren (40).

Die Darstellung eines dreidimensionalen Modells auf einem zweidimensionalen Bildschirm kann zu verzerrten Darstellungen führen, welche die korrekte Identifizierung der Messpunkte in der richtigen Achse bzw. Ebene erschweren (49). Dieser Umstand kann auch durch die diversen unterstützenden Funktionen der Software nicht vollständig kompensiert werden. Das Auswertungsprogramm Onyx Ceph® 3TM ermöglicht dem Nutzer ein 360°-Drehen des virtuellen Modells, sowie eine Zoom-Funktion, um den Messpunkt möglichst genau zu platzieren. Trotz dieser Vorteile kommen Horton et al. in ihrer Studie zu dem Schluss, dass die rein okklusale Ansicht die besten Ergebnisse in Bezug auf Genauigkeit, Wiederholbarkeit und Schnelligkeit aufweist (50).

In der vorliegenden Studie wurden primär die Auswirkungen eines absichtlich fehlerhaften inklinierten Modells beim Scanvorgang auf die Ergebnisse untersucht. Die benötigte Zeit für eine manuelle und digitale Messung wurde dabei nicht berücksichtigt. In der Literatur wird der Zeitfaktor kontrovers diskutiert. Einige Studien, welche den zeitlichen Vergleich zwischen digitaler und manueller Methode untersuchten, beschrieben eine längere Dauer für die Auswertung am Computer (41)(43). Andere Autoren bewerten die digitale Auswertung jedoch als deutliche Zeitersparnis zur konventionellen manuellen Auswertung (48)(51). In diesen

Studien wird jedoch nur die beanspruchte Zeit zum Vermessen der Modelle erfasst. Der Aufwand zur Erstellung der digitalen Datei wurde dabei vernachlässigt. Da es sich bei den digitalen Dateien um Modellscans handelt, muss das virtuelle Modell erst erstellt werden. Dieser Prozess umfasst einen mehrminütigen Scanprozess gefolgt von einer digitalen Bearbeitung. Die digitale Bearbeitung bezieht sich auf den Zuschnitt der rohen Modellscans, der Ausrichtung im dreidimensionalen Raum anhand von Ebenen und Punkten, dem anschließenden virtuellen Sockeln und dem Errechnen der fehlenden Weichteile. Diese Schritte entfallen bei der manuellen Messung. Der computergestützte Zugriff auf die virtuellen Modelle erfolgt allerdings wesentlich schneller als bei den konventionellen Modellen. Die konventionelle Methode umfasst das Entnehmen des Modellkastens aus dem Aufbewahrungsraum um an die Gipsmodelle zu gelangen. Die digitale Methode bietet den Vorteil, dass dieser Schritt über wenige Mausklicks am PC erfolgt. Das gestaltet sich für den Behandler einfacher und effizienter.

Eine Alternative zu einem Modellscanner wie dem orthoX® 3D stellen intraorale Scans dar. In bisherigen Studien wurden Verlässlichkeit und Genauigkeit von intraoral gewonnenen Daten als klinisch gültig erachtet (22)(52)(53). Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Abformung und die Herstellung eines Gipsmodells entfallen und somit die Fehlerkette reduziert werden kann. Nichtsdestotrotz kommen Grünheid et al. in ihrer Untersuchung zu der Erkenntnis, dass die konventionelle Abformung dem intraoralen Scan vorgezogen wird (52). Als Gründe werden neben dem erhöhten Zeitaufwand für die Digitalisierung des Modells seitens des Behandlers auch eine mangelnde Akzeptanz der Patienten angegeben. Ein weiterer Schwachpunkt des intraoralen Systems liegt in der digitalen Abformung ganzer Kiefer. Große Spannbreiten der Zahnbögen können laut Gan et al. die Genauigkeit der Werte beeinträchtigen (54).

Eine Alternative bietet die Erstellung eines digitalen Modells aus einer Abformung, wobei scanbare Abformmaterialien verwendet werden. Jedoch sind auch dieser Methode ihre physikalischen Grenzen gesetzt, da das Scannen von Abformungsdetails im Unterschnitt oder in engen Bereichen der Frontzähne zu Ungenauigkeiten führen können. Zudem bleibt die Fehlerquelle der konventionellen Abformung bestehen.

Nicht erfasst wurden in dieser Untersuchung vertikalen Strecken wie sie beispielsweise bei einem Overbite gemessen werden müssen. Die Analyse vertikaler Distanzen beim inkliniertem Scan könnte zu anderen Ergebnissen führen als eine bei Strecken, welche parallel zur Okklusionsebene gemessen werden. Weiterhin wäre die Untersuchung von Winkeln unter den gleichen Bedingungen von Interesse. In nachfolgenden Untersuchungen könnten so die

Wertegruppen aufgefächert und die einzelnen Werte auf Unterschiede zwischen den Scangruppen untersucht werden. Möglicherweise würden sich unterschiedliche Ergebnisse beim Scanvorgang in Inklinations für sagittale, transversale oder vertikale Strecken nachweisen lassen.

5.1.3 Statistische Auswertung

Die Verwendung eines Korrelationskoeffizienten zur Bewertung der Übereinstimmung zweier Messmethoden ist eine häufig verwendete Methode (29)(30). In dieser Studie wurde sich jedoch gegen die Verwendung eines Korrelationskoeffizienten entschieden, da dieser vornehmlich den linearen Zusammenhang zwischen zwei Wertereihen misst. Die Übereinstimmung der Werte muss bei positivem linearen Zusammenhang jedoch nicht gewährleistet sein. Sind die Werte der ersten Messmethode um 25% größer als die der zweiten Messmethode, besteht ungeachtet der unterschiedlichen Daten ein linearer Zusammenhang. Somit kann trotz hoher Werte des Korrelationskoeffizienten eine mangelnde klinische Austauschbarkeit der Methoden bestehen. Dieser Umstand wird auch in anderen Studien bemängelt (8)(34)(41)(44)(45). Aus diesem Grund wurden in dieser Studie die Messwerte mittels t-Test untersucht und die Streuung der Messwerte über Bland-Altman-Diagramme dargestellt.

Für die Vergleiche der digitalen Scangruppen und den manuellen - digitalen Vergleichen erfolgte eine Unterteilung der zu untersuchenden Parameter in drei Gruppen: Irregularitätsindex (II), Längen (L) und Zahnbreiten (ZB). Unterschiede zwischen den verschiedenen Parametern sollten somit leichter identifiziert werden. Für die manuellen und digitalen Messwiederholungen wurde keine Unterteilung der Werte in Gruppen vorgenommen.

Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) kam zur Anwendung, wenn mehr als zwei Parameter miteinander verglichen wurden. Fiel die ANOVA statistisch signifikant aus, wurden anschließend t-Tests für verbundene Stichproben für jede der drei Kombinationen durchgeführt, um zu klären zwischen welchen Parametern signifikante Unterschiede bestanden. Für den Vergleich der digitalen Messwiederholungen bzw. dem manuell - digitalem Vergleich konnte der t-Test ohne vorherige ANOVA durchgeführt werden.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Intrarraterreliabilität der manuellen und digitalen Messwiederholung

Ein wichtiger Aspekt einer Messmethode ist deren Reliabilität. Eine hohe Variabilität der Messwerte im Rahmen von Messwiederholung spiegelt eine schlechte Verlässlichkeit der Methode wider. Im günstigsten Fall würde bei einem Vergleich der verschiedenen Zeitpunkte die durchschnittliche Differenz gleich Null tendieren.

Die Ergebnisse der wiederholten Messungen bei der manuellen Auswertung zeigten, dass sich Oberkiefer und Unterkiefer in der Gegenüberstellung der Zeitpunkte 2 und 3 nicht signifikant voneinander unterscheiden. Für den Oberkiefer gab es außerdem keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Zeitpunkten 1 und 3. Ggesetzt den Fall, dass ein Lernprozess stattgefunden hat, zeigte sich, dass insbesondere die Werte der ersten Messwiederholung sich von den Werten zum Zeitpunkt 2 und 3 unterscheiden. Die mittlere Differenz zwischen M 2 und M 3 beträgt für den Oberkiefer -0,009 (SD: 0,298) mm und für den Unterkiefer 0,015 (SD: 0,242) mm. Der Unterkiefer wies durchschnittlich größere mittlere Differenzen im Vergleich zum Oberkiefer auf. Diese Beobachtung deckte sich mit den Ergebnissen von Santoro et al. und Mullen et al. (37)(48). Die Gegenüberstellung der Zeitpunkte 1 und 3 ergab mit 0,063 (SD: 0,287) mm den größten Unterschied. Die durchschnittliche Divergenz der Daten lässt sich mit den Ergebnissen von Choi et al. und Zilberman et al. vergleichen (55)(56). Die mittlere Differenz der Messwiederholungen durch einen Untersucher wird von Santoro et al. auf $\leq 0,2$ mm beschrieben (57) und in anderen Studien als Vergleichswert übernommen (37)(46). Ein systematischer Fehler bei der Identifizierung der Messpunkte kann somit ausgeschlossen werden.

Die Auswertung der digitalen Messwiederholungen ließ keine deutlichen Unterschiede zwischen den Scangruppen erkennen. Die unterschiedlichen Scanpositionen der Modelle wirkten sich dementsprechend nicht auf die Ergebnisse der Messwiederholungen aus. Ähnlich den manuellen Messwiederholungen wies auch der Unterkiefer bei den digitalen Messungen im Mittel größere Differenzen auf. Der maximale Werte betrug hierbei -0,048 (SD: 0,258). Eine höhere Variabilität der Messwerte für den Unterkiefer wurde durch die Autoren Santoro et al. und Mullen et al. beschrieben (37)(48). Im Kontrast dazu belegen andere Studien, dass der Oberkiefer eine höhere Variabilität aufweist (8)(41)(49).

Die mittlere Differenz der digitalen Messwiederholungen ließ sich mit den Ergebnissen von Horton et al. und Stevens et al. vergleichen (8)(50). Hierbei befanden sich die Differenzen unterhalb der Grenze von 0,2 mm, womit systematische Fehler der digitalen

Messpunktlokalisierung ausgeschlossen werden können. Eine Tendenz zu geringeren Werten bei der wiederholten digitalen Messung wie sie durch beschrieben wurde, konnte in dieser Studie nicht beobachtet werden (48).

Die Reviews von Luu et al. und Rossini et al. bestätigen, dass die digitale Arbeitsweise in ihrer Reliabilität ebenso verlässlich ist wie die manuelle Methode (29)(30). Mit der fortlaufenden Ausreifung der Dokumentationssoftware wäre es erstrebenswert die digitale Auswertung autonom über Punkt-Identifikation auswerten zu lassen (28). Anhand der virtuellen Ausmessungen des Kiefers könnten die gewählten Messpunkte eigenständig von einer Diagnostiksoftware definiert und gegebenenfalls durch den Behandler korrigiert werden. Die Resultate könnten dadurch reproduzierbarer werden, da sich die intra-individuelle Variabilität reduzieren würde.

In dieser Studie lieferte die digitale Auswertung eine bessere Reproduzierbarkeit der Messwerte. Dies steht im Einklang mit den Untersuchungen von Bell et al. und Dowling et al. (44)(58). Die Autoren Reuschl und Heuer, Sjögren et al., Mullen et al., Stevens et al. kommen in ihren Studien jedoch zu dem Schluss, dass die wiederholte Erhebung der manuellen Daten wiederum eine geringere Variabilität aufweist (8)(41)(48)(51). Die mittleren Differenzen der manuellen und digitalen Auswertungsmethode dieser Studie lagen beide im Bereich von 0,2 mm. Der erinnerungsfreie Zeitraum zwischen den Messungen betrug 1 Woche. Ein besseres Abschneiden der digitalen Methode in der vorliegenden Studie konnte aufgrund der geringen Differenz am ehesten durch das individuell geringfügig unterschiedliche Setzen der Messpunkte begründet sein. Ein Vergleich der Bland-Altman-Diagramme im Rahmen der manuellen oder der digitalen Messwiederholungen erbrachte keine Tendenz zu deutlich größeren bzw. kleineren Übereinstimmungsgrenzen. Wie die Analyse gezeigt hatte, sind die gemessenen Differenzen klinisch irrelevant.

Die manuelle und digitale Auswertung erfolgten unabhängig von der hierfür benötigten Zeit. Zilberman und Huggare formten den Gedanken, dass die Zeitmessung sich auf Kosten der Genauigkeit auswirken kann. Folglich hätte die Zeitmessung in dieser Untersuchung zu anderen Aussagen führen können (56).

5.2.2 Vergleich zwischen manueller und digitaler Auswertung

Die Validität der digitalen Auswertung ist neben der Reliabilität ein wichtiges Kriterium für die sinnvolle Anwendung im klinischen Alltag. Sie ist ein Maß dafür, inwieweit eine Methode die zu messende Größe korrekt wiedergibt. In diesem Fall musste die digitale Auswertung im Vergleich zum Goldstandard der manuellen Messung Bestand haben.

Der Vergleich zwischen manueller und digitaler Auswertung zeigte für die Gruppen II und ZB der digitalen Messung durchgehend kleinere Werte. Dies bestätigt die Beobachtungen anderer Publikationen (6)(10)(18)(21)(33)(34). Im Kontrast dazu stehen die Resultate von Horton et al. und Quimby et al., welche der digitalen Auswertung eine Neigung zu größeren Werten zuschreiben (6)(50). Zudem konnten für die Gruppen II und ZB im Unterkiefer geringere mittlere Differenzen als im Oberkiefer festgestellt werden.

Die Gruppe L zeigte keine Tendenz zu kleineren Werten. Mit Ausnahme des Vergleiches D_{Norm} 1 und M2 der Gruppe L im Oberkiefer unterschied sich die manuelle Methode kaum von der digitalen Methode. Alle Vergleiche der Gruppe II und ZB wiesen hingegen statistisch signifikante Unterschiede auf. Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass für die Messungen der vorderen und hinteren Zahnbogenbreite sowie für die Messungen der Zahnbogenhöhe keine physikalischen Hindernisse auftraten, wenn manuell ausgewertet wurde. Die Spitzen des Messschiebers konnten frei auf die Okklusalfächen platziert werden, wogegen bei der Messung der Zahnbreiten oder des Irregularitätsindex diese nicht ungehindert an die Kontaktpunkte der Zähne angelegt werden konnte. Dies führte dazu, dass sich manuelle und digitale Messwerte für die Gruppe Längen (vorderen und hinteren Zahnbogenbreite, Zahnbogenhöhe) geringer voneinander unterschieden und die Ergebnisse der t-Tests mehrheitlich unauffällig ausfielen. Die Beobachtungen von größeren Differenzen bei längeren Streckenmessungen, wie von Czarnota et al. beschrieben, konnten in dieser Untersuchung nicht festgestellt werden (59).

Aus Mangel an vergleichbaren Studien hinsichtlich der mittleren Differenz zwischen manueller und digitaler Messung des Irregularitätsindex konnten die gewonnenen Daten nur eingeschränkt mit der Literatur verglichen werden. Die digitale Messung des Irregularitätsindex ergab durchschnittlich geringere Werte als bei der manuellen Messung. Im Mittel fielen die digitalen Messungen für den Oberkiefer um 0,283 mm und für den Unterkiefer um 0,244 mm kleiner aus. Diese Differenz lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass bei der manuellen Auswertung des Irregularitätsindex keine Werte unter 0,3 mm erfasst wurden. Strecken kleiner 0,3 mm konnten wegen der Unhandlichkeit des digitalen Messschiebers und der in dieser Größenordnung überdimensionierten Messspitzen nicht mehr erfasst werden. Diese Distanzen wurden somit gleich Null gestellt. Die digitale Streckenmessung berücksichtigte hingegen Werte bis 0,1 mm. Ähnliche Assoziationen zogen Dowling et al. in ihrer Studie (44). Eine weitere Begründung für die niedrigeren Werte der digitalen Auswertung liegt in der Definition des Irregularitätsindex. Hier wird ein möglichst paralleles Führen des Messschiebers zur Okklusionsebene verlangt. Vertikale Strecken sollen nicht erfasst werden (4). Jedoch kann diese Anforderung nicht immer erfüllt werden. Ein

unbeabsichtigtes Abweichen der horizontalen Messposition führt zum Messen in einer leichten Diagonalstellung. Dadurch werden vertikale Strecken mit erfasst, welche die Resultate verfälschen können. Des Weiteren ist in einigen Fällen ein Schätzen der Kontaktpunkte notwendig, was zu weiteren Ungenauigkeiten führen kann (44).

Zur Berechnung des Little Irregularitätsindex im Auswertungsprogramm Onyx Ceph® 3TM, wurden die anatomischen Kontaktpunkte der Zähne 13 - 23 und 33 - 43 definiert. Die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Messpunkten wurden auf die Okklusionsebene projiziert. Alle gemessenen Werte beinhalteten somit nur die Anteile der Strecken, welche parallel zur Okklusionsebene verlaufen. Vertikale Anteile der Strecken wurden nicht erfasst und die digitalen Werte fielen somit geringer aus.

Die mittleren Differenzen aller untersuchten Vergleiche zwischen den manuellen und digitalen Messungen lagen unterhalb 0,5 mm. Bei Durchsicht der Literatur fällt auf, dass der Großteil der Publikationen trotz teils signifikanten Unterschieden zwischen manueller und digitaler Methode, diese als klinisch irrelevant erachteten. Rossini et al. und Luu et al. wiesen in ihren systematischen Reviews nach, dass Differenzen $< 0,5$ mm bei Einzelwertmessungen als klinisch tolerable Grenze betrachtet werden können (29)(30). Auch Fleming et al. beschrieben in ihrem Review, dass Differenzen von 0,04 bis 0,4 mm für lineare Längenmessungen und 0,01 bis 0,3 mm für Zahnbreiten als klinisch irrelevant angesehen werden können (28). Somit kann nach Auswertung der Daten auch in dieser Studie bestätigt werden, dass die digitale Auswertung eine valide Alternative zur manuellen Methode darstellt.

Die als Goldstandard geltende manuelle Messung an Gipsmodellen wird in den Arbeiten von Stevens et al. und Horton et al. in Frage gestellt (8)(50). Als Kritikpunkt wird angeführt, dass der reell zu messende Wert im klinischen Alltag nicht bestimmt werden kann. Ein Gipsmodell stelle nur eine Annäherung an die intraorale Situation dar. Des Weiteren könne der Messschieber aufgrund physikalischer Hindernisse Strecken wie zum Beispiel Zahnbreiten nicht richtig erfassen. Demgegenüber wäre die digitale Methode insofern vorteilhafter, als dass Messpunkte genau in die interproximalen Regionen platziert werden könnten. Somit können Resultate erzielt werden, die der manuellen Methode überlegen sind (8)(50). Zusammen mit ihren Vorteilen könnte es sein, dass die digitalen Modelle die Gipsmodelle als Goldstandard ablösen (30).

5.2.3 Gegenüberstellung der digitalen Scangruppen

Keine Studie untersuchte bisher die Fragestellung, ob Unterschiede zwischen einer inklinierten Modellposition und einer nicht inklinierten Modellposition im 3D-Scanner bestehen. Ansätze dazu bieten die Arbeiten von Almasaoud und Bearn und Horton et al. (46)(50). Almasoud und Bearn prüften in ihrem Testverfahren ob Modellfotografien ausreichend genau und verlässlich seien, um den Little Irregularitätsindex zu bestimmen. Hierbei wurden die Modelle aus neun verschiedenen Winkelperspektiven von 70° bis 110° abfotografiert und anschließend ausgewertet. Horton et al. untersuchten die beste Ansicht zur Messung von Zahnbreiten an digitalen Modellen. Das Untersuchungsverfahren unterschied dabei fünf unterschiedliche Ansichten im Auswertungsprogramm, von einer rein okklusalen Ansicht bis hin zu Rotation und Zoom.

Nach Auswertung der vorliegenden Daten konnte kein Muster abgeleitet werden, welches den Messungen der anteinklinierten oder retroinklinierten Modelle höhere oder niedrigere Werte zuschrieb. Die mittleren Differenzen zwischen D_{Norm} , D_{Retro} und D_{Ante} schienen gleich verteilt. Lediglich für die Gruppe L im Unterkiefer erzielten die Vergleiche deutlich höhere mittlere Differenzen. Der Vergleich $D_{\text{Norm}} / D_{\text{Ante}}$ der Gruppe L zum Zeitpunkt 1 zeigte hierbei die höchste mittlere Differenz von 0,195 mm und einer Standardabweichung von 0,374 mm. Ein Vergleich der Ergebnisse der digitalen Messwiederholungen zeigte, dass die mittleren Differenzen zwischen den digitalen Scangruppen höhere Werte aufzeigten als die der Messwiederholungen. Die mittleren Differenzen des t-Tests ergaben im Oberkiefer durchschnittlich 0,050 mm, im Unterkiefer durchschnittlich 0,052 mm. Die Differenzen der digitalen Messwiederholungen beliefen sich im Mittel auf 0,015 mm bzw. 0,030 mm. Somit bestand für die digitalen Scangruppen eine höhere Variabilität als für die digitalen Messwiederholungen. Ein Vergleich der Bland-Altman-Diagramme zwischen den digitalen Scangruppen und den digitalen Messwiederholungen ergab ebenfalls trotz unterschiedlicher Mittelwerte annähernd gleiche Übereinstimmungsgrenzen. Die mittleren Differenzen zwischen den digitalen Scangruppen lagen alle unterhalb der Grenze von 0,2 mm bzw. 0,5 mm und waren somit als klinisch nicht relevant zu erachten. Zusammenfassend ließ sich feststellen, dass eine inklinierte Modellpositionierung im 3D Scanner trotz statistisch signifikanter Differenzen keinen nennenswerten Einfluss auf die Messungen hat.

Diese Erkenntnis legt weiterhin dar, dass das dreidimensionale Trimmen eines Gipsmodells analog des 3-Ebenen-Systems nebensächlich wird, da dieser Vorgang für die digitale Auswertung nach dem Scanprozess in der Auswertungssoftware erfolgt.

Diese Beobachtung ist ferner von Interesse in Bezug auf die computergestützte Überlagerung von eingescannten Gipsmodellen zur Messung von Zahnbewegungen, wie sie in einer Studie von Choi et al. beschrieben wird (55). Ein möglicher Kritikpunkt wäre, dass eine wiederholt gleiche Positionierung unterschiedlicher Modelle im Scanner nicht gewährleistet werden kann. Hieraus können Scans aus unterschiedlichen Einstellungswinkeln entstehen welche wiederum zu veränderten Auswertungen führen könnten. Dieses Argument konnte jedoch widerlegt werden durch die Beobachtung dieser Untersuchung, dass eine unterschiedliche Positionierung im Modellscanner keine Auswirkung auf die Auswertung hat.

5.3 Schlussfolgerung

Die zunehmende Digitalisierung der Zahnmedizin bietet ein immer größeres Spektrum an Möglichkeiten. Hierbei findet die virtuelle Erstellung von Modellen und deren computergestützte Auswertung zunehmend Verwendung im kieferorthopädischen Tätigkeitsfeld (10). Die Auswertung der Ergebnisse ließ die Fragestellungen dieser Untersuchung folgend beantworten:

- Die Vermessung von Gipsmodellen mit einem elektronischen Messschieber sowie die computergestützte Auswertung von Modellscans mit der OnyxCeph3TM - Software ist reproduzierbar möglich.
- Die digitalen Messwiederholungen wiesen im Vergleich zu den manuellen Messwiederholungen eine bessere Reproduzierbarkeit auf. Ungeachtet dessen lagen die mittleren Differenzen beider Methoden unterhalb von 0,2 mm und konnten der Intraraterreliabilität zugeschrieben werden.
- Die computergestützte Auswertung von Modellscans mit der OnyxCeph3TM - Software ist ebenso valide und reproduzierbar wie die konventionelle Vermessung von Gipsmodellen mit einem elektronischen Messschieber.
- Abweichungen des Little Irregularitätsindex an kieferorthopädischen Modellen unter inklinierter Positionierung im 3D - Scanner wurden in dieser Untersuchung nicht festgestellt. Diese Aussage traf auch für alle anderen Parameter zu. Demzufolge kann eine inklinierte Modellpositionierung im 3D-Scanner ungeachtet bleiben.

Ein Vergleich zwischen manueller und digitaler Auswertung zeigte keine klinisch relevanten Unterschiede. Zusammengefasst sind die Differenzen aller analysierten Daten trotz statistisch signifikanter Unterschiede im klinischen Alltag zu vernachlässigen.

6 Literaturverzeichnis

1. Harzer W (2011) Kieferorthopädie. Georg Thieme, Stuttgart
2. Lisson JA (2012) Ätiologie und Genese der Dysgnathien im Rahmen des kieferorthopädischen Behandlungskurses I. pp 1-171
3. Nötzel F, Schultz C (eds) (2009) Leitfaden der kieferorthopädischen Diagnostik: Analysen und Tabellen für die Praxis. 2. Auflage. Deutscher Zahnärzterverlag, Köln
4. Little RM (1975) The Irregularity Index: A quantitative score of mandibular anterior alignment. Am J Orthod. 68:554-563
5. Kassenzahnärztliche Vereinigung Berlin (2013). Aufbewahrungsfristen.
6. Quimby ML, Vig KWL, Rashid RG, Firestone AR (2004) The accuracy and reliability of measurements made on computer-based digital models. Angle Orthod 74:298–303
7. Peluso MJ, Josell SD, Levine SW, Lorei BJ (2004) Digital models: An introduction. Semin Orthod 10:226–38
8. Stevens DR, Flores-Mir C, Nebbe B, Raboud DW, Heo G, Major PW (2006) Validity, reliability, and reproducibility of plaster vs digital study models: Comparison of peer assessment rating and Bolton analysis and their constituent measurements. Am J Orthod Dentofac Orthop 129:794–803
9. Dalstra M, Melsen B (2009) From alginate impressions to digital virtual models: accuracy and reproducibility. J Orthod. 36:36–41
10. Shastry S, Park JH (2014) Evaluation of the use of digital study models in postgraduate orthodontic programs in the United States and Canada. Angle Orthod 84:62–67
11. Karatas OH, Toy E (2014) Three-dimensional imaging techniques: A literature review. Eur J Dent 8:132–140
12. Cheffins OW, Clark WAS (1969) Close-range Photogrammetry applied to research in orthodontics. The Photogrammetric 33:276–283
13. Höflinger W (1996) Digital stereophotogrammetric solutions for orthodontics. Int Arch Photogramm Remote Sensing 31:247-252
14. Miras D, Sander FG (1993) Die Genauigkeit von Hologrammen im Vergleich zu anderen Modellvermessungen. Fortschritte der Kieferorthopädie 54:203–217
15. Rydén H, Bjelkhagen H, Mårtensson B (1982) Tooth position measurements on dental casts using holographic images. Am J Orthod 81:310–313
16. Sander FG, Tochtermann H (1991) Dreidimensionale computergestützte Modell- und Hologrammauswertung. Fortschritte der Kieferorthopädie 52:218–229

17. Kuroda T, Motohashi N, Tominaga R, Iwata K (1996) Three-dimensional dental cast analyzing system using laser scanning. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 110:365–369
18. Alcañiz M, Montserrat C, Grau V, Chinesta F, Ramón A, Albalat S (1998) An advanced system for the simulation and planning of orthodontic treatment. *Med Image Anal* 2:61–77
19. Motohashi N, Kuroda T (1999) A 3D computer-aided design system applied to diagnosis and treatment planning in orthodontics and orthognathic surgery. *Eur J Orthod* 21:263–274
20. Sohmura T, Kojima T, Wakabayashi K, Takahashi J (2000) Use of an ultrahigh-speed laser scanner for constructing three-dimensional shapes of dentition and occlusion. *J Prosthet Dent* 84:345–352
21. El-Zanaty HM, El-Beialy AR, Abou El-Ezz AM, Attia KH, El-Bialy AR, Mostafa YA (2010) Three-dimensional dental measurements: An alternative to plaster models. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 137:259–265
22. Wiranto MG, Engelbrecht WP, Tutein Nolthenius HE, Van Der Meer WJ, Ren Y (2013) Validity, reliability, and reproducibility of linear measurements on digital models obtained from intraoral and cone-beam computed tomography scans of alginate impressions. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 143:140–147
23. Rangel FA, Maal TJJ, Bronkhorst EM, Breuning KH, Schols JGJH, Bergé SJ (2013) Accuracy and Reliability of a Novel Method for Fusion of Digital Dental Casts and Cone Beam Computed Tomography Scans. *PLoS One* 8:1–8
24. White AJ, Fallis DW, Vandewalle KS (2010) Editor's Comment and Q&A. Analysis of intra-arch and interarch measurements from digital models with 2 impression materials and a modeling process based on cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 137:456–457
25. Koch AW (1998) *Optische Messtechnik an technischen Oberflächen: Praxisorientierte lasergestützte Verfahren zur Untersuchung technischer Objekte hinsichtlich Form, Oberflächenstruktur und Beschichtung*. expert Verlag, Renningen
26. Wiora G (2001) *Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltungsvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren*.
27. Przybilla HJ (2007) *Streifenprojektion – Grundlagen, Systeme und Anwendungen*.
28. Fleming PS, Marinho V, Johal A (2011) Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models: A systematic review. *Orthod Craniofac Res* 14:1–16
29. Luu NS, Nikolcheva LG, Retrouvey J-M, Flores-Mir C, El-Bialy T, Carey JP (2012) Linear measurements using virtual study models. *Angle Orthod* 82:1098–1106

30. Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi CL (2016) Diagnostic accuracy and measurement sensitivity of digital models for orthodontic purposes: A systematic review. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 149:161–170
31. Von der Wense CL (2013) Vergleichbarkeit der Erfassung metrischer Werte an konventionellen Gipsmodellen und 3D-Scans
32. Tränkmann J (1985) Die Plattenapparatur in der Kieferorthopädie. Quintessenz, Berlin
33. Dentauro Deutschland (2016) Digitale Kieferorthopädie pur!
34. Grouven U, Bender R, Ziegler A, Lange S (2007) Vergleich von Messmethoden. *Dtsch medizinische Wochenschrift* 132:69–73
35. Michalakis KX, Stratos A, Hirayama H, Pissiotis AL, Touloumi F (2009) Delayed setting and hygroscopic linear expansion of three gypsum products used for cast articulation. *J Prosthet Dent* 102:313–318
36. Michalakis KX, Asar NV, Kapsampeli V, Magkavali-Trikka P, Pissiotis AL, Hirayama H (2012) Delayed linear dimensional changes of five high strength gypsum products used for the fabrication of definitive casts. *J Prosthet Dent* 108:189–195
37. Santoro M, Galkin S, Teredesai M, Nicolay OF, Cangialosi TJ (2003) Comparison of measurements made on digital and plaster models. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 124:101–105
38. Hunter WS, Priest WR (1959) Errors and Discrepancies in Measurement of Tooth Size. *J D Res* 39:405–414
39. Shellhart WC, Lange DW, Kluemper GT, Hicks EP, Kaplan AL (1995) Reliability of the Bolton tooth-size analysis when applied to crowded dentitions. *The Angle orthodontist* 65:327–334
40. Watanabe-Kanno GA, Abrão J, Miasiro HJ, Sánchez-Ayala A, Lagravère MO (2009) Reproducibility, reliability and validity of measurements obtained from Ceph3 digital models. *Braz oral Res* 23:288–295
41. Sjögren APG, Lindgren JE, Huggare JÅ V (2010) Orthodontic study cast analysis - Reproducibility of recordings and agreement between conventional and 3D virtual measurements. *J Digit Imaging* 23:482–492
42. Burns A, Dowling AH, Garvey TM, Fleming GJP (2014) The reliability of Little's Irregularity Index for the upper dental arch using three dimensional (3D) digital models. *J Dent* 42:1320–1326
43. Mayers M, Firestone AR, Rashid R, Vig KWL (2005) Comparison of peer assessment rating (PAR) index scores of plaster and computer-based digital models. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 128:431–434

44. Dowling AH, Burns A, Macauley D, Garvey TM, Fleming GJP (2013) Can the intra-examiner variability of Little's Irregularity Index be improved using 3D digital models of study casts? *J Dent* 41:1271–1280
45. MacAuley D, Garvey TM, Dowling AH, Fleming GJP (2012) Using Little's Irregularity Index in orthodontics: Outdated and inaccurate? *J Dent* 40:1127–1233
46. Almasoud N, Bearn D (2010) Little's irregularity index: Photographic assessment vs study model assessment. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 138:787–794
47. Bernabé E, Flores-Mir C (2006) Estimating arch length discrepancy through Little's Irregularity Index for epidemiological use. *Eur J Orthod* 28:269–273
48. Mullen SR, Martin CA, Ngan P, Gladwin M (2007) Accuracy of space analysis with emodels and plaster models. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 132:346–352
49. Leifert MF, Leifert MM, Efstratiadis SS, Cangialosi TJ (2009) Comparison of space analysis evaluations with digital models and plaster dental casts. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 136:16.e1-16.e4
50. Horton HMI, Miller JR, Gaillard PR, Larson BE (2010) Technique Comparison for Efficient Orthodontic Tooth Measurements Using Digital Models. *Angle Orthodontist* 80:254-261
51. Reuschl R, Heuer W (2016) Reliability and validity of measurements on digital study models and plaster models. *Eur J Orthod* 11:1–5
52. Grünheid T, McCarthy SD, Larson BE (2014) Clinical use of a direct chairside oral scanner: An assessment of accuracy, time, and patient acceptance. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 146:673–682
53. Zhang F, Suh KJ, Lee KM (2016) Validity of Intraoral Scans Compared with Plaster Models: An In-Vivo Comparison of Dental Measurements and 3D Surface Analysis. *Public Library of Science* 11:1-10
54. Gan N, Xiong Y, Jiao T (2016) Accuracy of intraoral digital impressions for whole upper jaws, including full dentitions and palatal soft tissues. *PLoS One* 11:1–15
55. Choi DS, Jeong YM, Jang I, Jost-Brinkmann PG, Cha BK (2010) Accuracy and reliability of palatal superimposition of three-dimensional digital models. *Angle Orthod* 80:497–503
56. Zilberman O, Huggare JA PK (2003) Evaluation of the Validity of Tooth Size and Arch Width Measurements Using Conventional and Three-dimensional Virtual Orthodontic Models. *Angle Orthod* 73:301-306
57. Santoro M, Ayoub ME, Pardi VA, Cangialosi TJ (2000) Mesiodistal Crown Dimensions and Tooth Size Discrepancy of the Permanent Dentition of Dominican Americans. *Angle Orthod* 70:303–307

58. Bell A, Ayoub AF, Siebert P (2003) Assessment of the accuracy of a three-dimensional imaging system for archiving dental study models. *J Orthod* 30:219–223
59. Czarnota J, Hey J, Fuhrmann R (2016) Measurements using orthodontic analysis software on digital models obtained by 3D scans of plaster casts : Intrarater reliability and validity. *J Orofac Orthop* 77:22–30

7 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Jörg Lisson für die Überlassung des interessanten Themas, seiner freundlichen Betreuung und der stets zeitnahen Unterstützung bei allen auftretenden Fragen.

Ganz herzlich möchte ich mich auch bei Frau Dr. Franziska Georg für die fachliche Betreuung und ihrer Hilfe für den Studienaufbau bedanken.

Frau Dr. Gudrun Wagenpfeil möchte ich für das gemeinsame Ausarbeiten der statistischen Analyse sowie der freundlichen und geduldigen Unterstützung danken.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr. Rolf Kühnert und Frau Antje Leichsenring für die mühevollen Umsetzung der erarbeiteten Auswertungsanalyse.

Meinen Eltern und meinem Bruder möchte ich für ihre liebevolle und moralische Unterstützung während meines Studiums und dieser Arbeit herzlichst danken.

Marie Donner möchte ich für die harte Arbeit des Korrekturlesens und ihrer stets liebevollen Unterstützung danken.

8 Anhang

8.1 Gegenüberstellung der drei Scangruppen

Die folgenden Bland-Altman-Diagramme stellen die Streuung der Differenzen zwischen den unterschiedlichen Scangruppen dar. In Blau dargestellt, ist der Mittelwert dargestellt. Die obere und untere Übereinstimmungsgrenzen sind jeweils rot markiert.

8.1.1 Oberkiefer

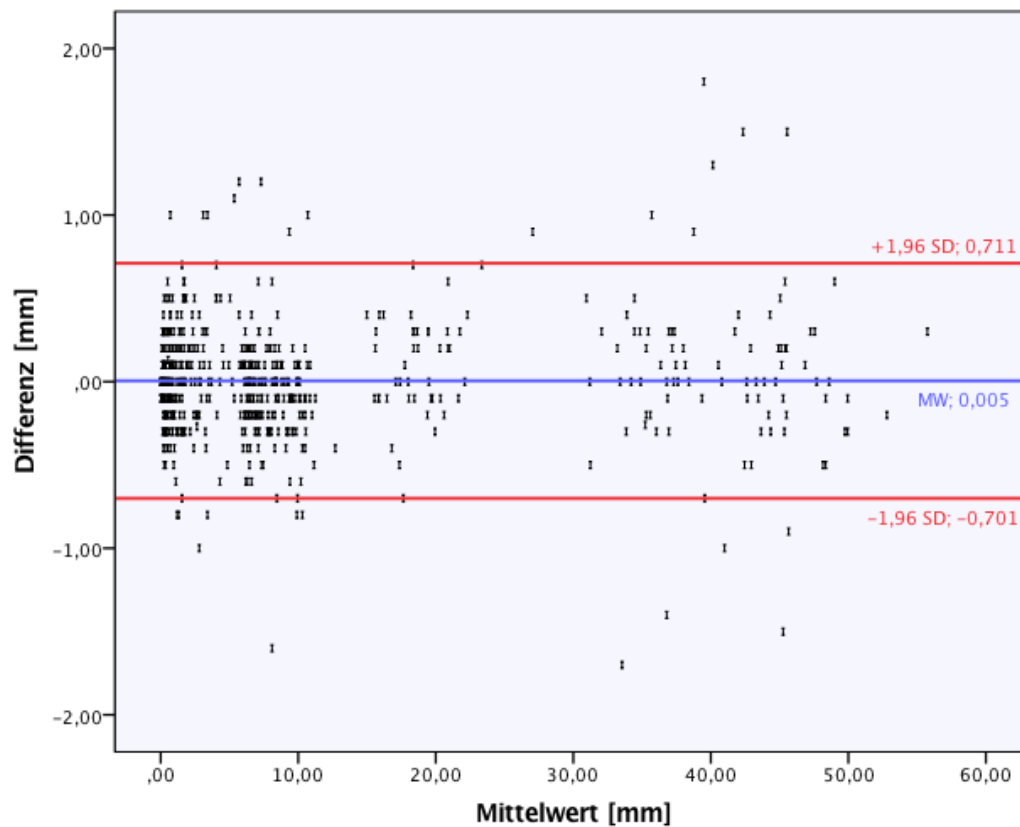
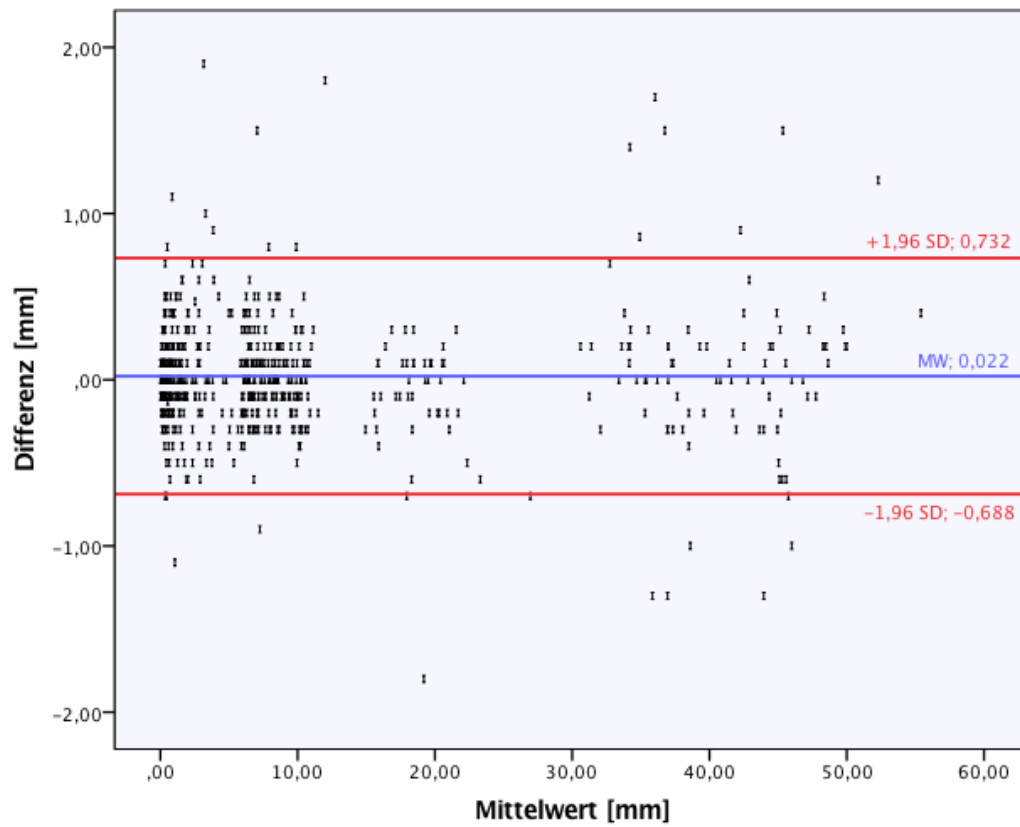
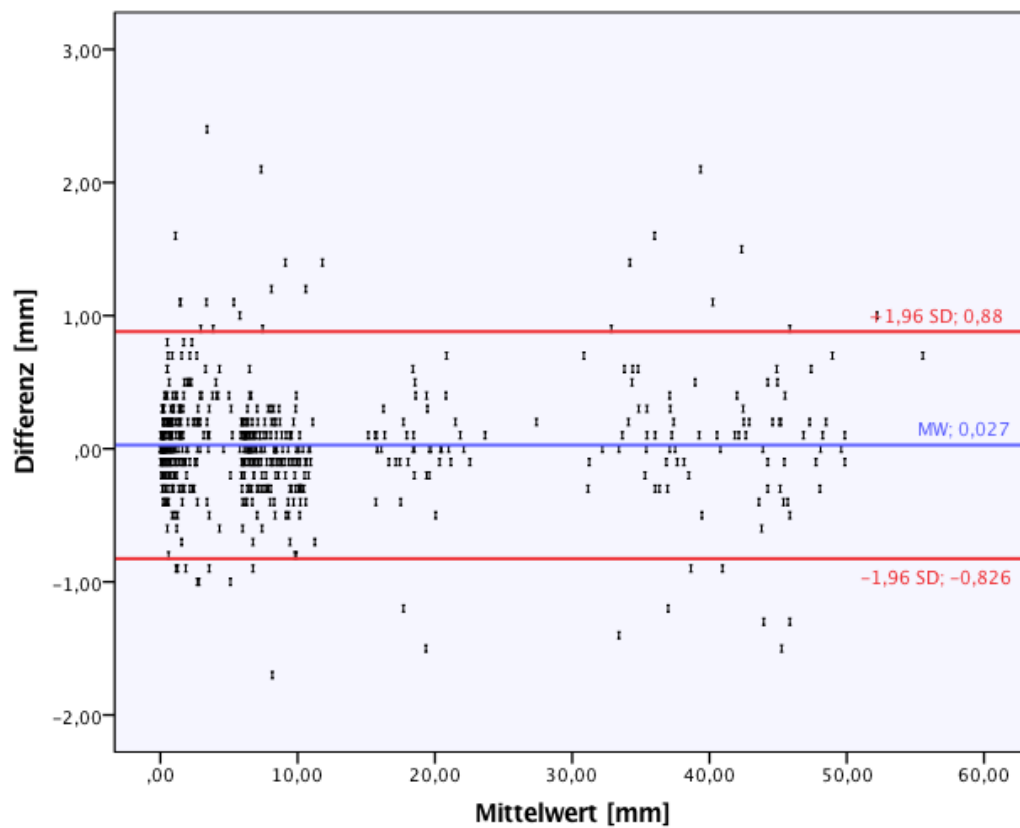
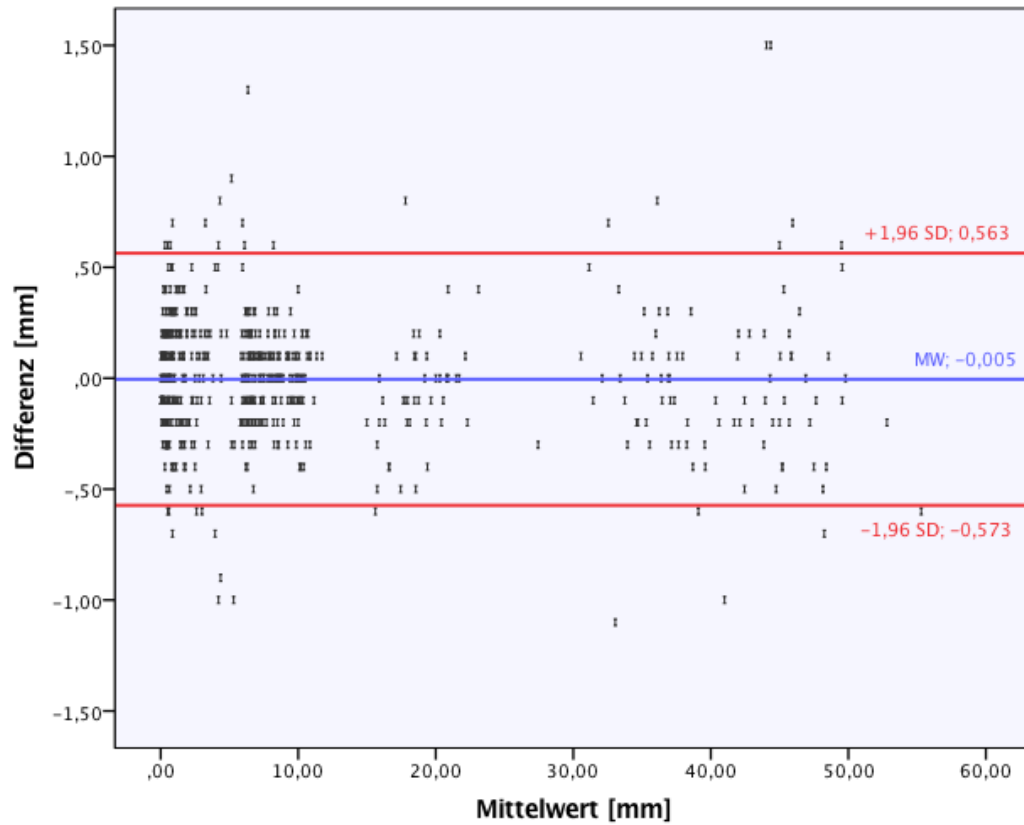
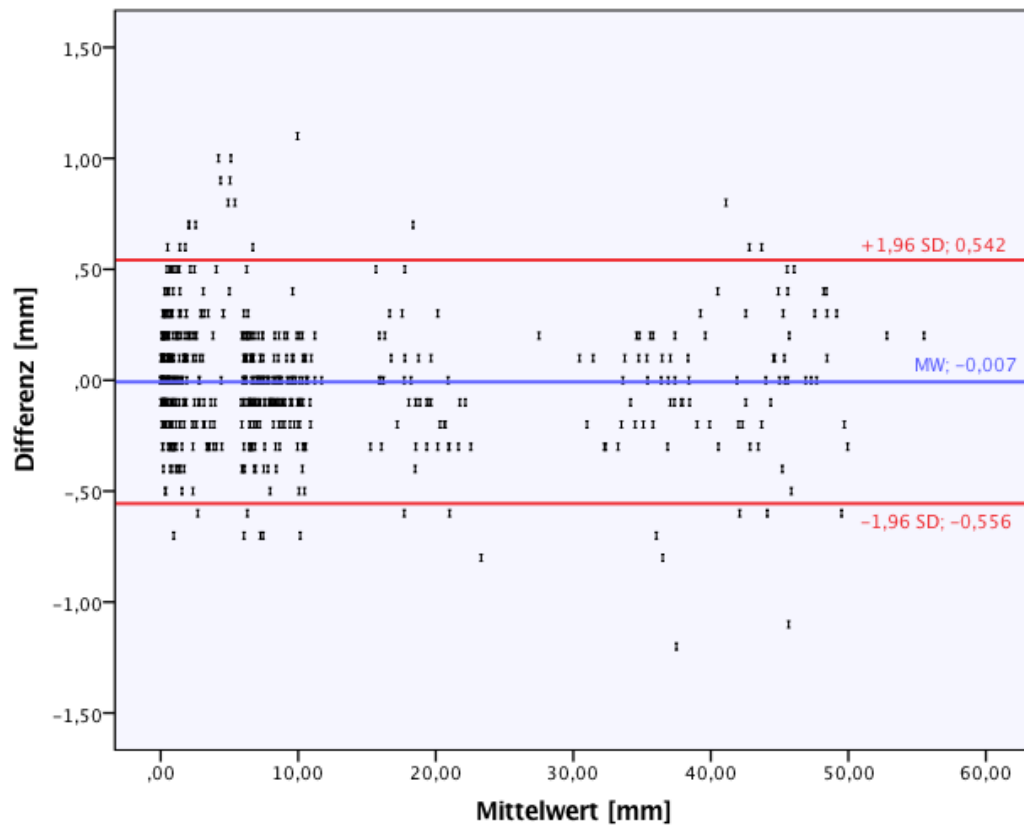


Abb. 9: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - $D_{\text{Norm}}/D_{\text{Retro}}$ zum Zeitpunkt 1

Abb. 10: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - $D_{\text{Retro}}/D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 1Abb. 11: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - $D_{\text{Norm}}/D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 1

Abb. 12: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - $D_{\text{Norm}}/D_{\text{Retro}}$ zum Zeitpunkt 2Abb. 13: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - $D_{\text{Retro}}/D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 2

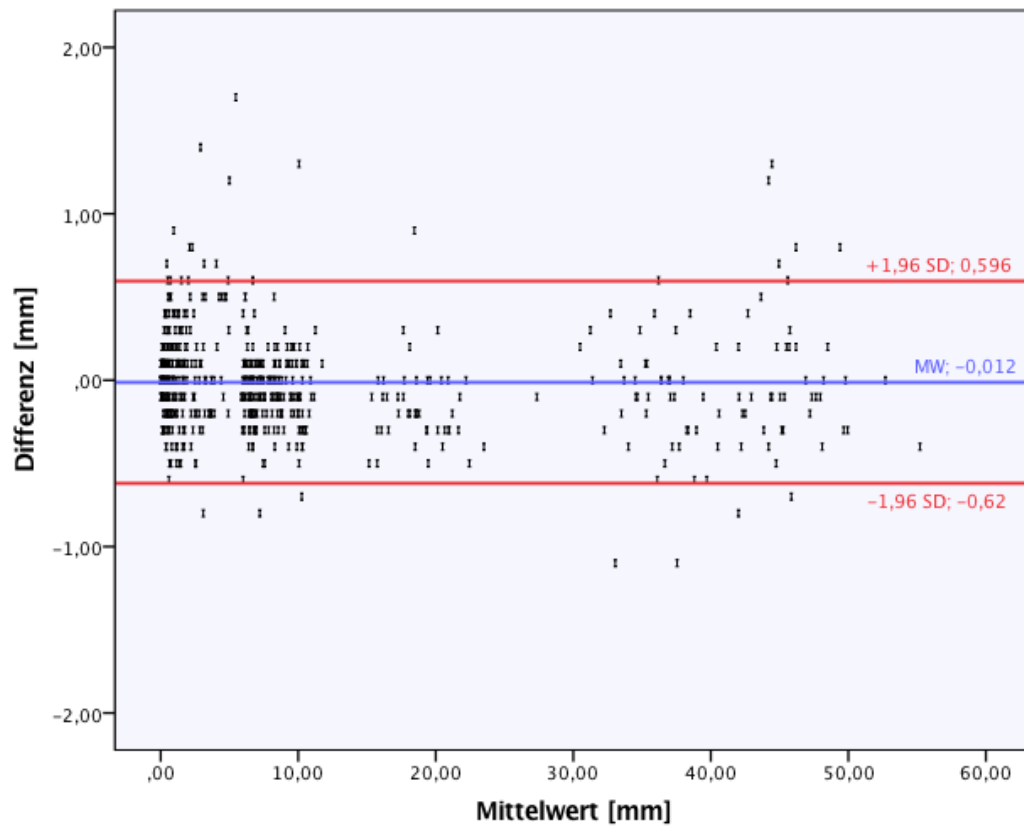
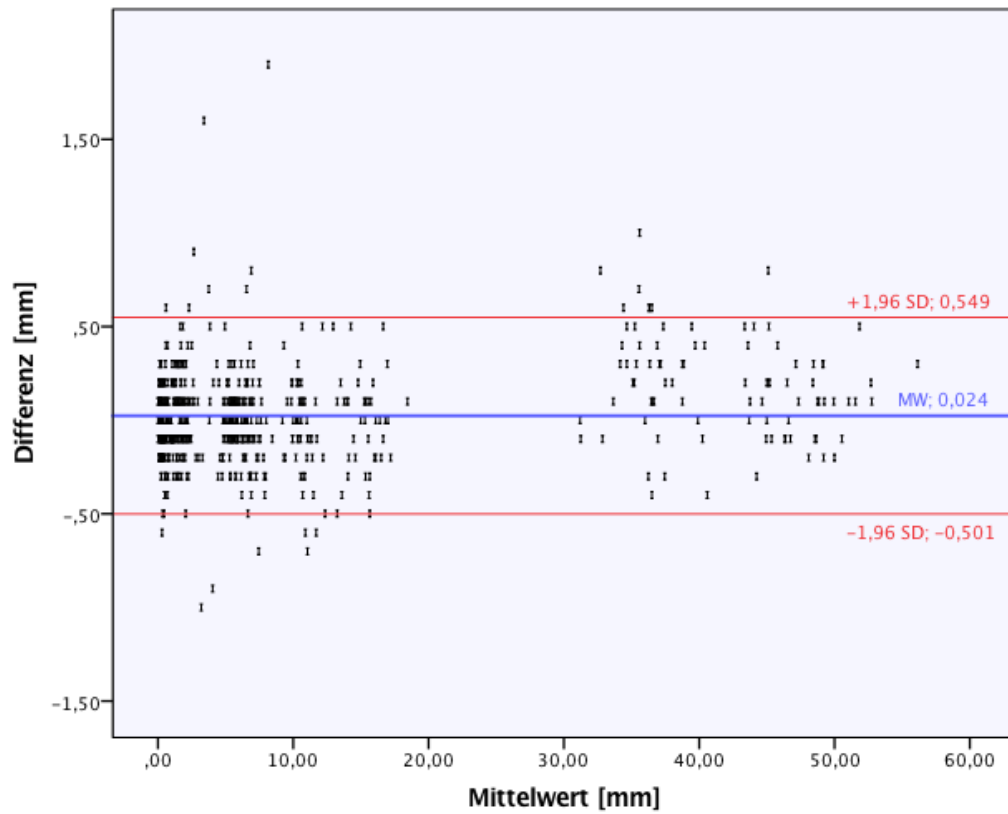
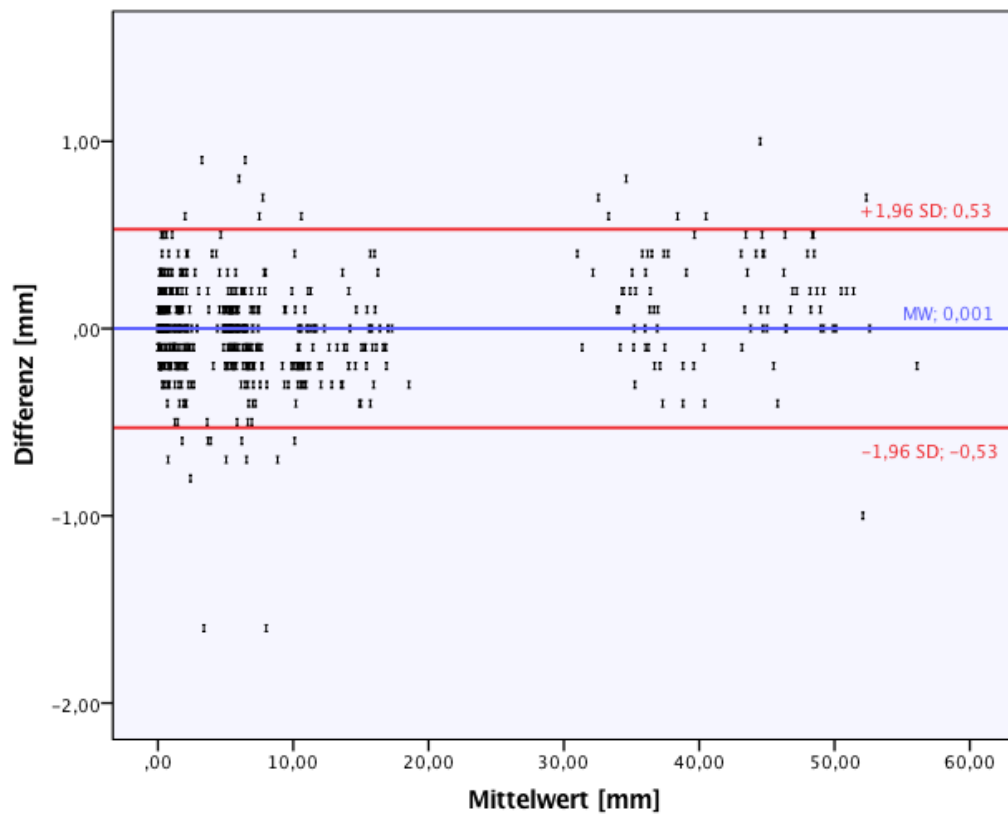
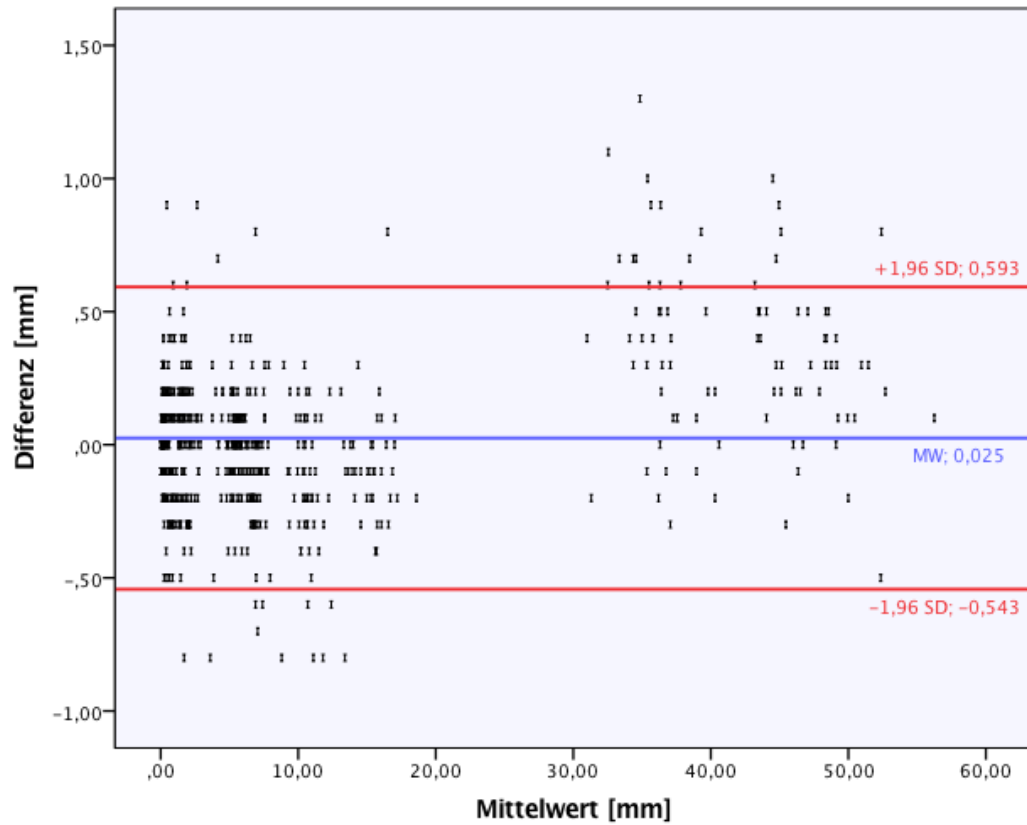
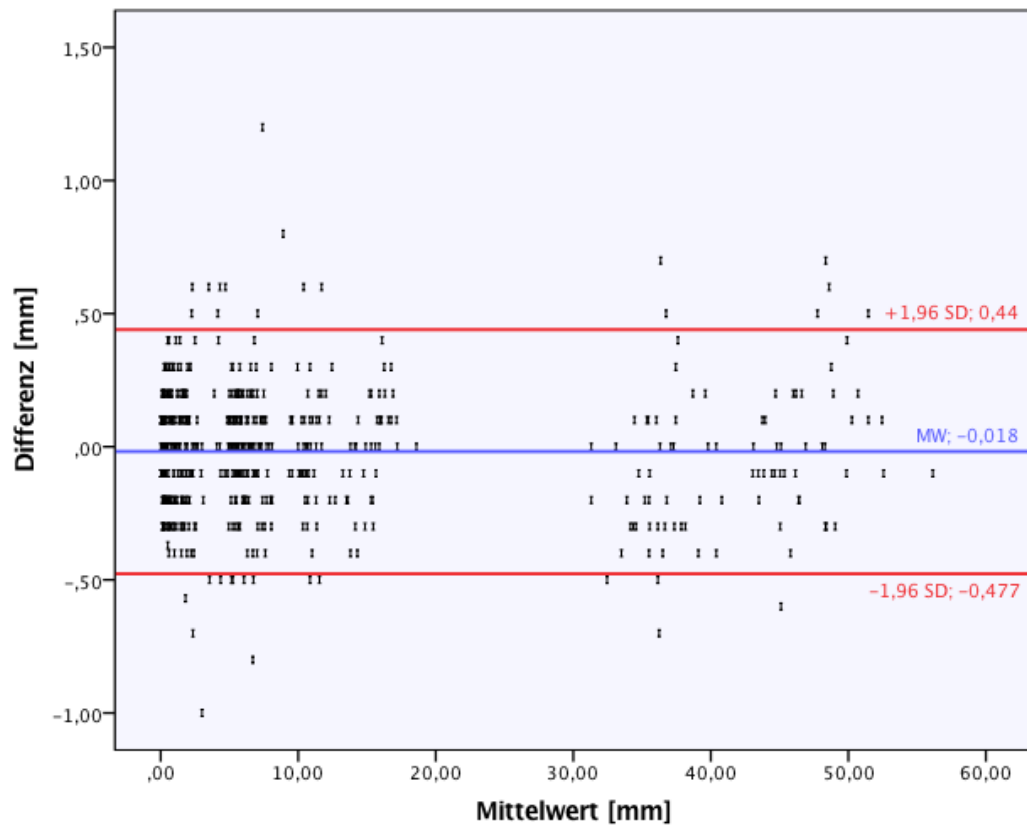
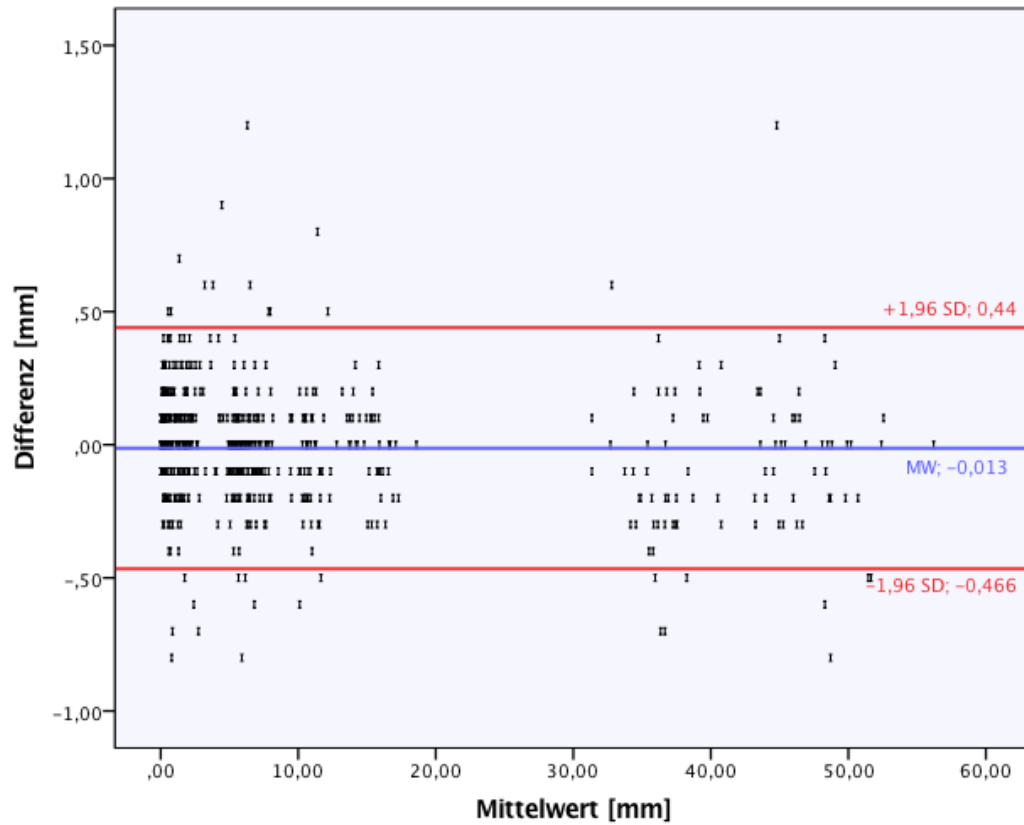
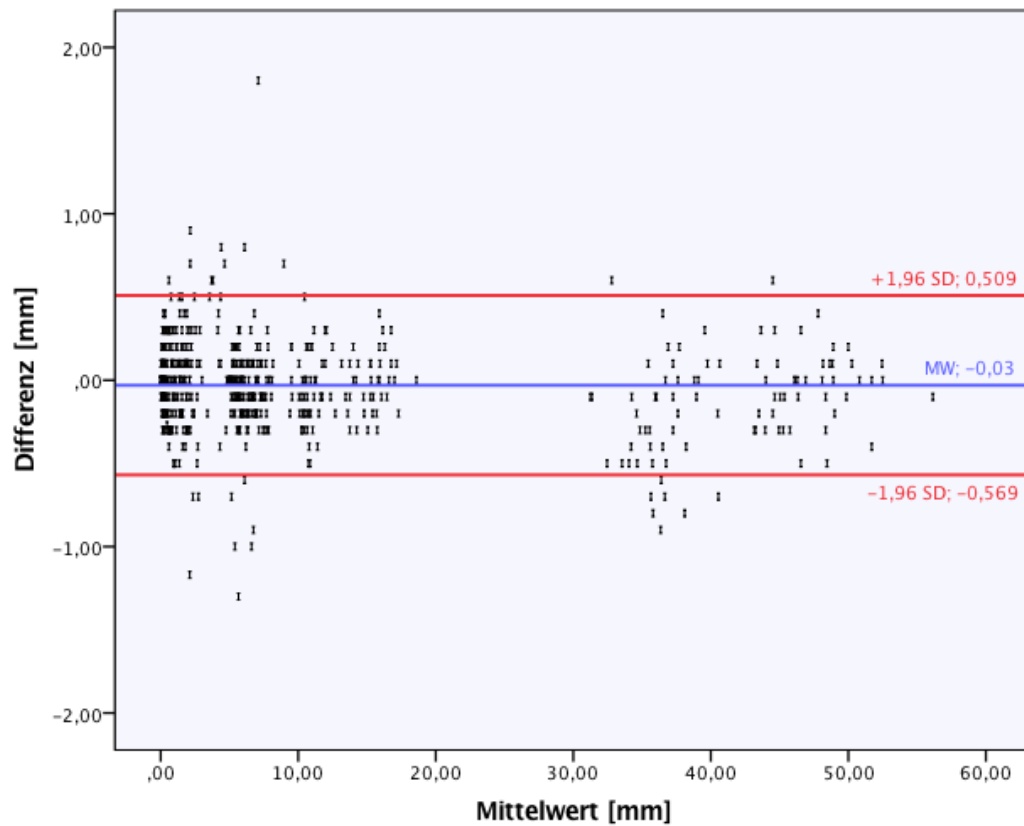


Abb. 14: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - $D_{\text{Norm}}/D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 2

8.1.2 Unterkiefer

Abb. 15: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - $D_{\text{Norm}}/D_{\text{Retro}}$ zum Zeitpunkt 1Abb. 16: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - $D_{\text{Retro}}/D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 1

Abb. 17: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - $D_{\text{Norm}}/D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 1Abb. 18: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - $D_{\text{Norm}}/D_{\text{Retro}}$ zum Zeitpunkt 2

Abb. 19: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - $D_{\text{Retro}}/D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 2Abb. 20: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - $D_{\text{Norm}}/D_{\text{Ante}}$ zum Zeitpunkt 2

8.2 Ergebnisse der Messwiederholung der drei Scangruppen

In den folgenden Bland-Altman-Diagrammen werden die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Scangruppen zu den Messzeitpunkten 1 und 2 dargestellt. Den Grafiken sind Mittelwert (blau) sowie obere und untere Übereinstimmungsgrenzen (rot) zu entnehmen.

8.2.1 Oberkiefer

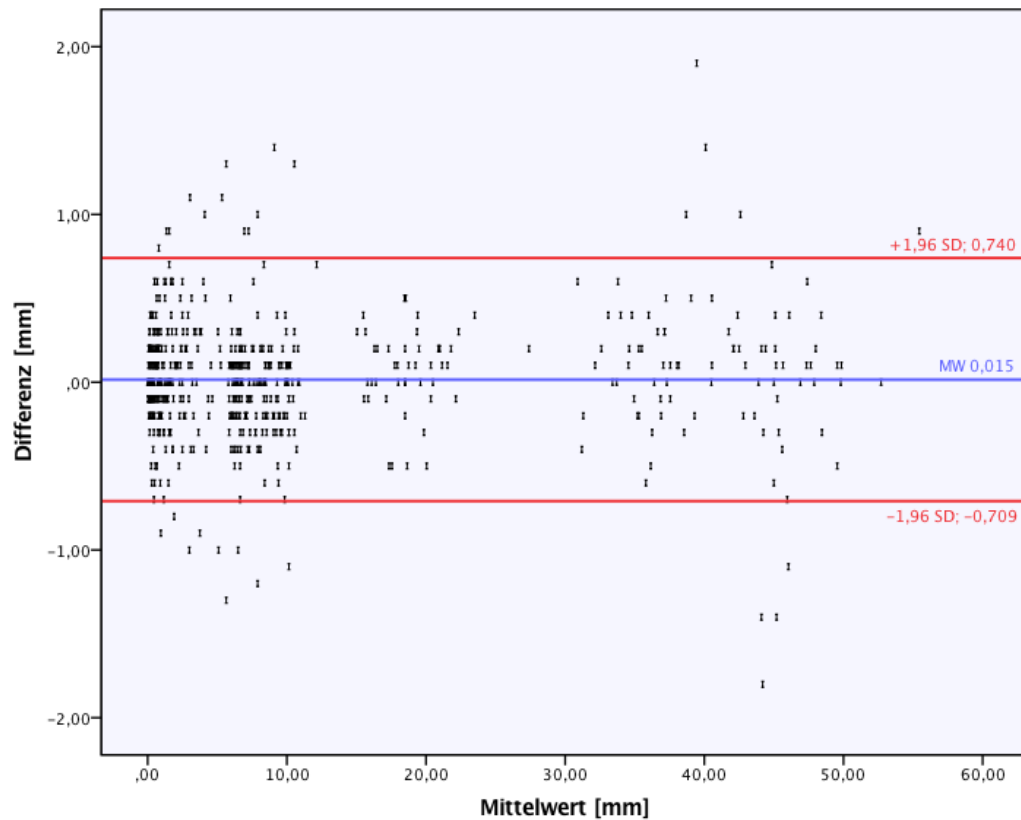
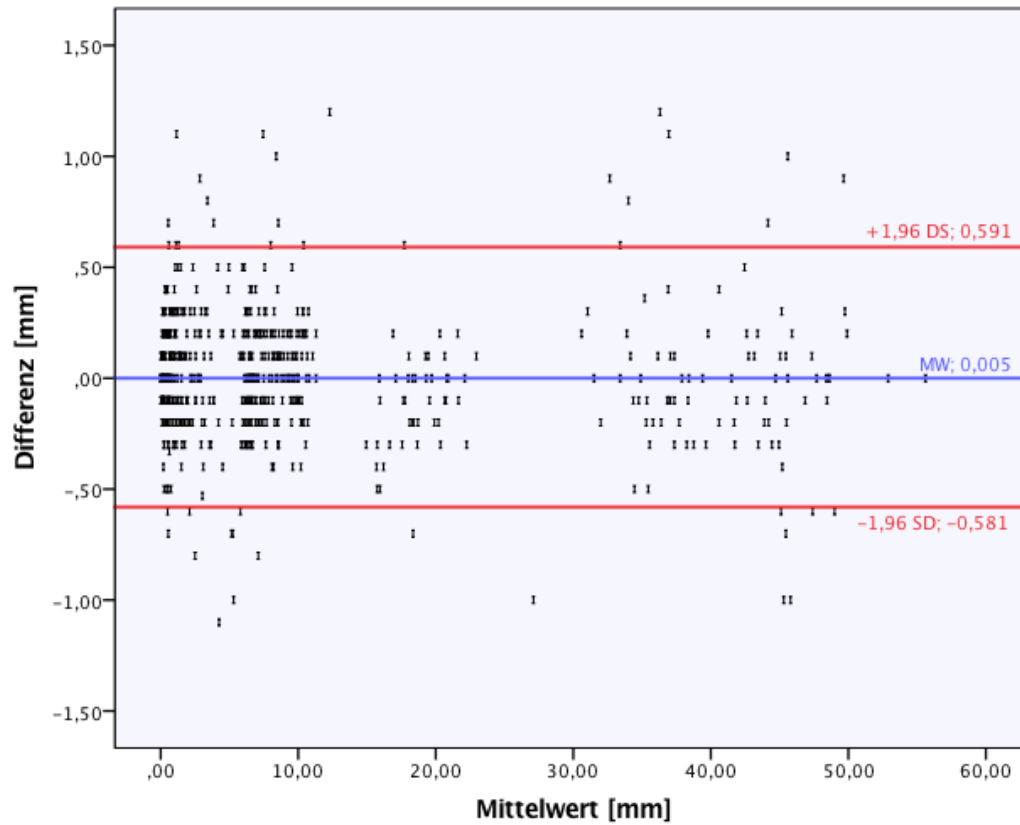
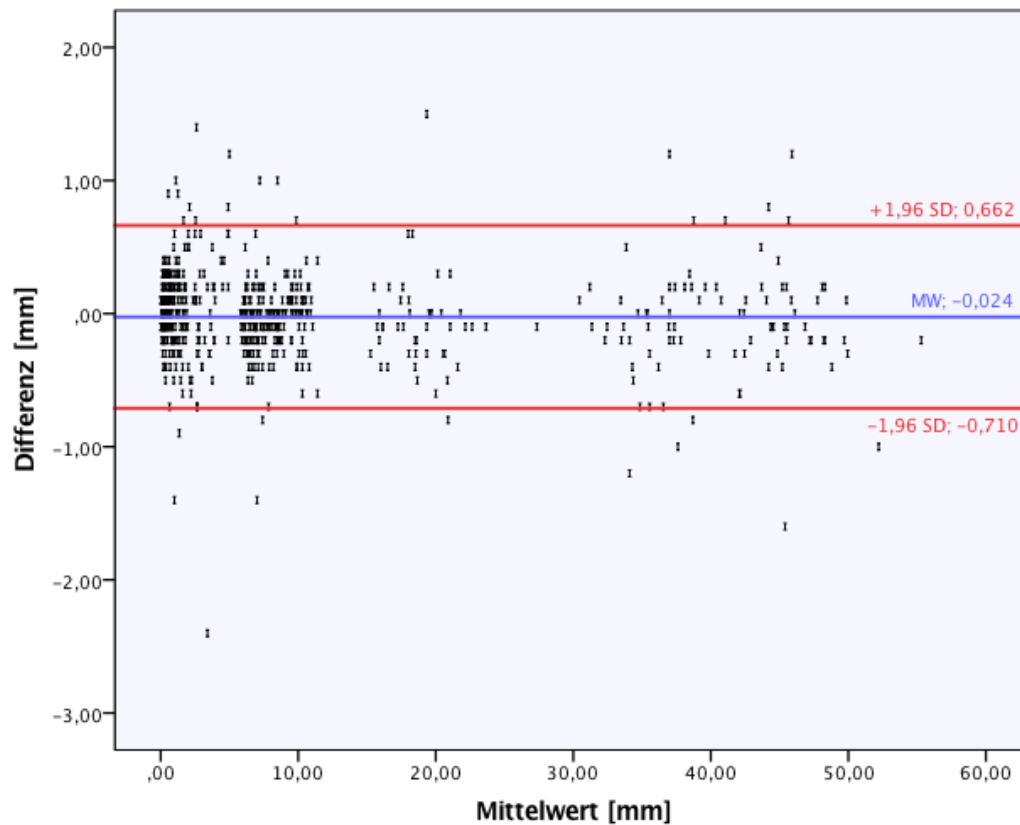
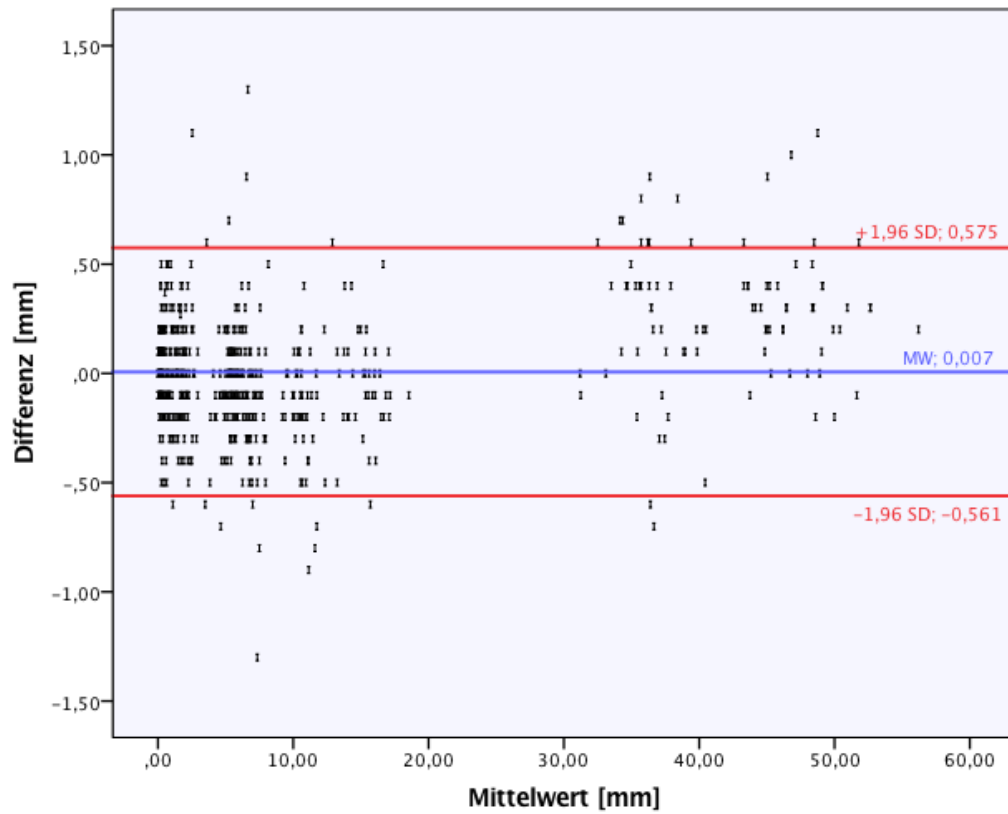
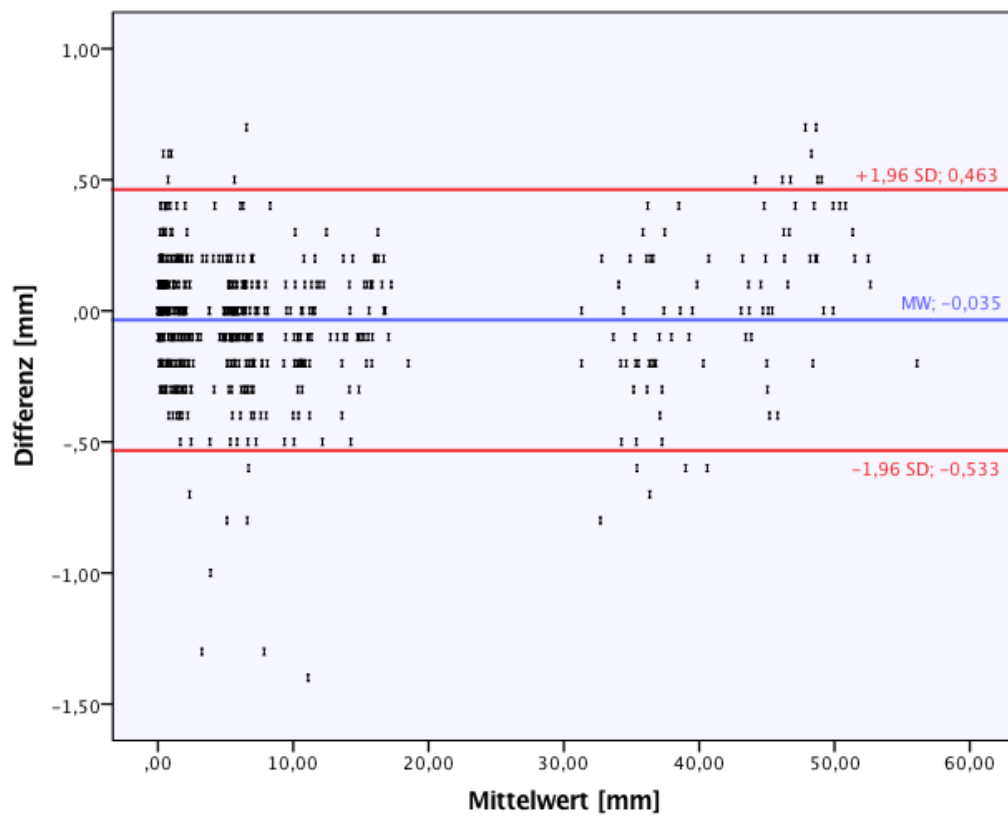


Abb. 21: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - Messwiederholung - D_{Norm} zu den Zeitpunkten 1 und 2

Abb. 22: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - Messwiederholung - D_{Retro} zu den Zeitpunkten 1 und 2Abb. 23: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - Messwiederholung - D_{Ante} zu den Zeitpunkten 1 und 2

8.2.2 Unterkiefer

Abb. 24: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - Messwiederholung - D_{Norm} zu den Zeitpunkten 1 und 2Abb. 25: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - Messwiederholung - D_{Retro} zu den Zeitpunkten 1 und 2

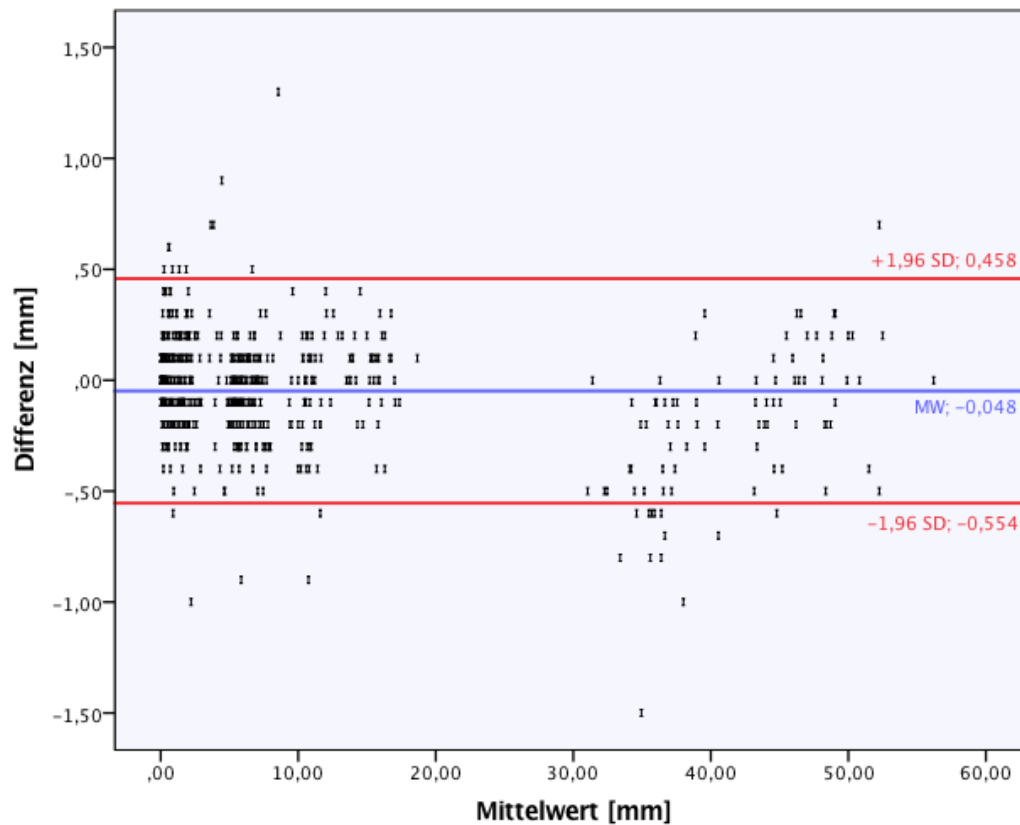
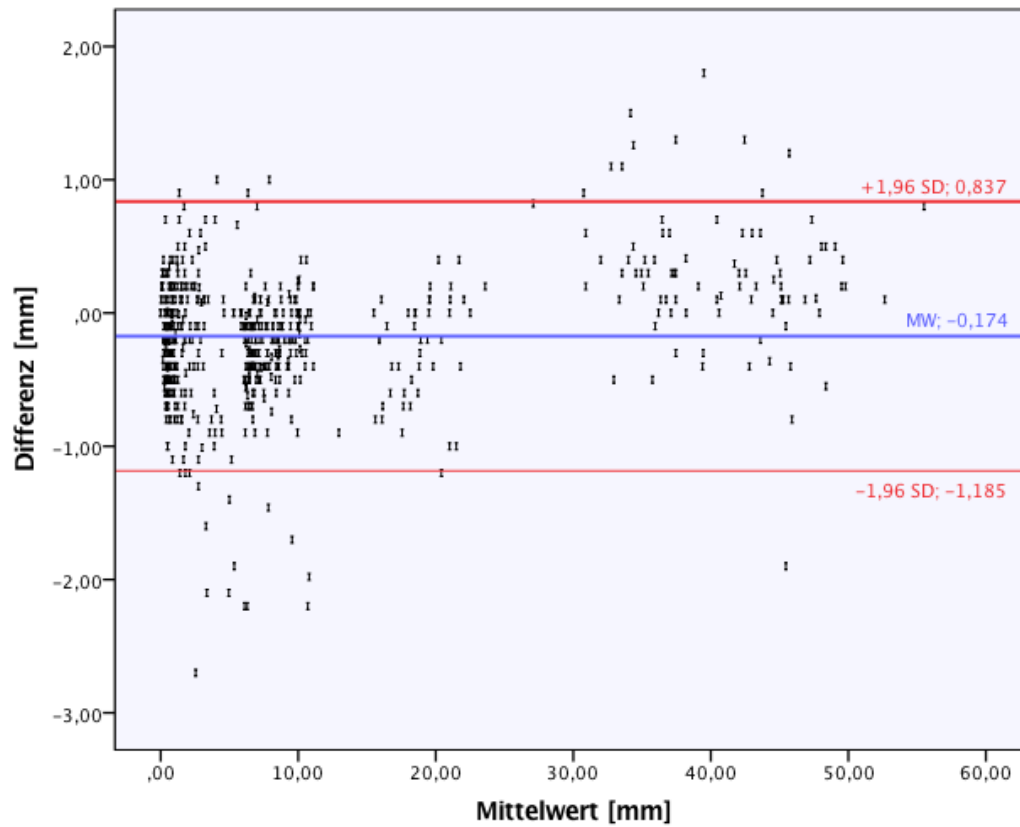
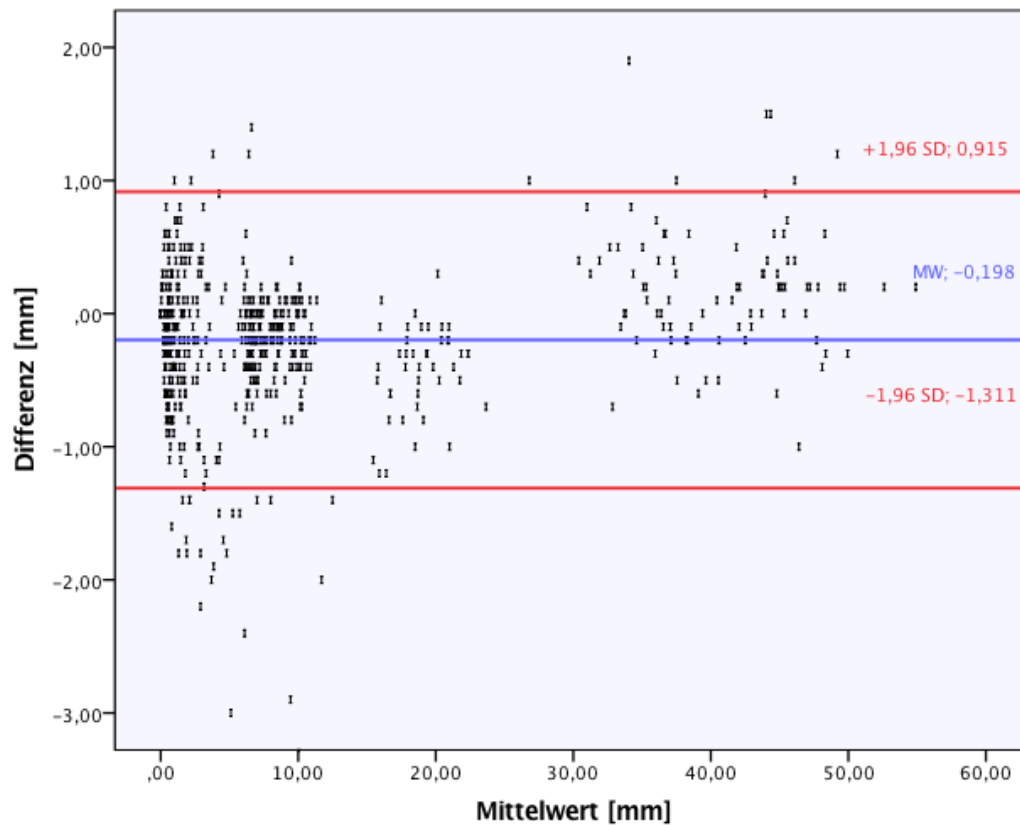


Abb. 26: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - Messwiederholung - D_{Ante} zu den Zeitpunkten 1 und 2

8.3 Manuell - digitaler Vergleich

Den folgenden Bland-Altman-Diagrammen können die Ergebnisse des manuell - digitalen Vergleichs entnommen werden. Der Mittelwert ist blau, die Übereinstimmungsgrenzen rot gekennzeichnet.

8.3.1 Oberkiefer

Abb. 27: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - $D_{\text{Norm1}}/M2$ Abb. 28: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - $D_{\text{Norm2}}/M3$

8.3.2 Unterkiefer

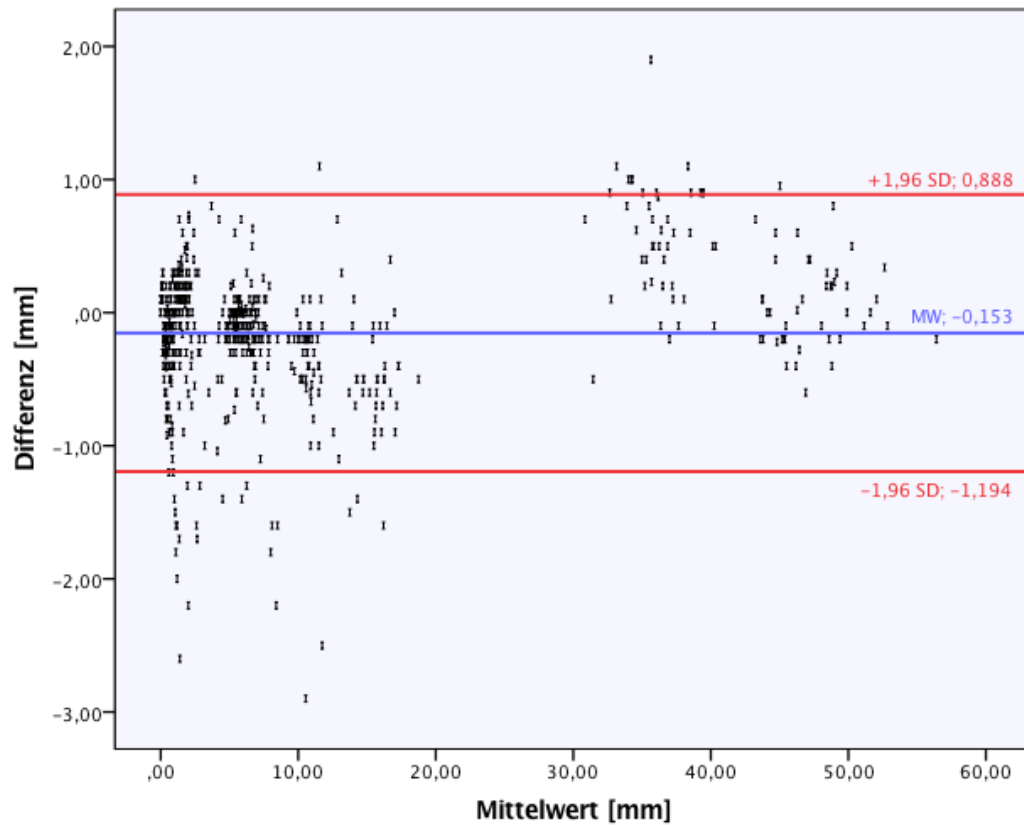


Abb. 29: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - $D_{\text{Norm}1/M2}$

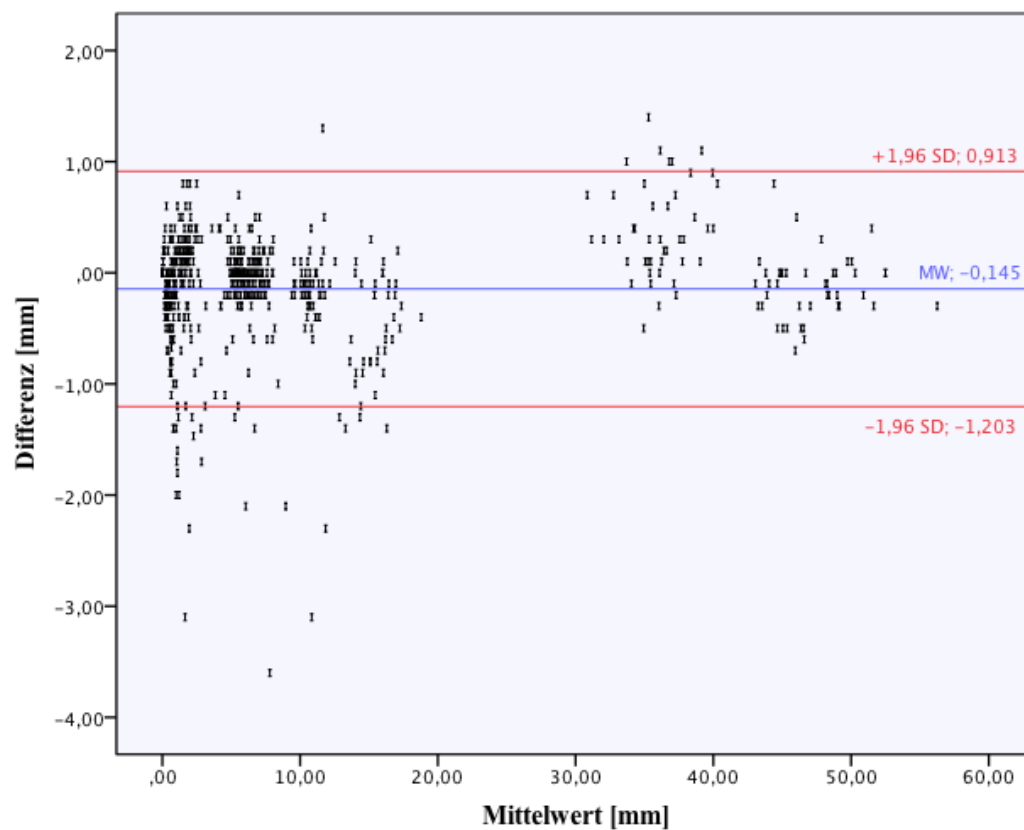


Abb. 30: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - $D_{\text{Norm}2/M3}$

8.4 Ergebnisse der Messwiederholung der manuellen Messung

Nachfolgend sind die Messwiederholungen der manuellen Messung grafisch in Bland-Altman-Diagrammen festgehalten. Den Diagrammen können der Mittelwert (blau) sowie die Übereinstimmungsgrenzen (rot) entnommen werden.

8.4.1 Oberkiefer

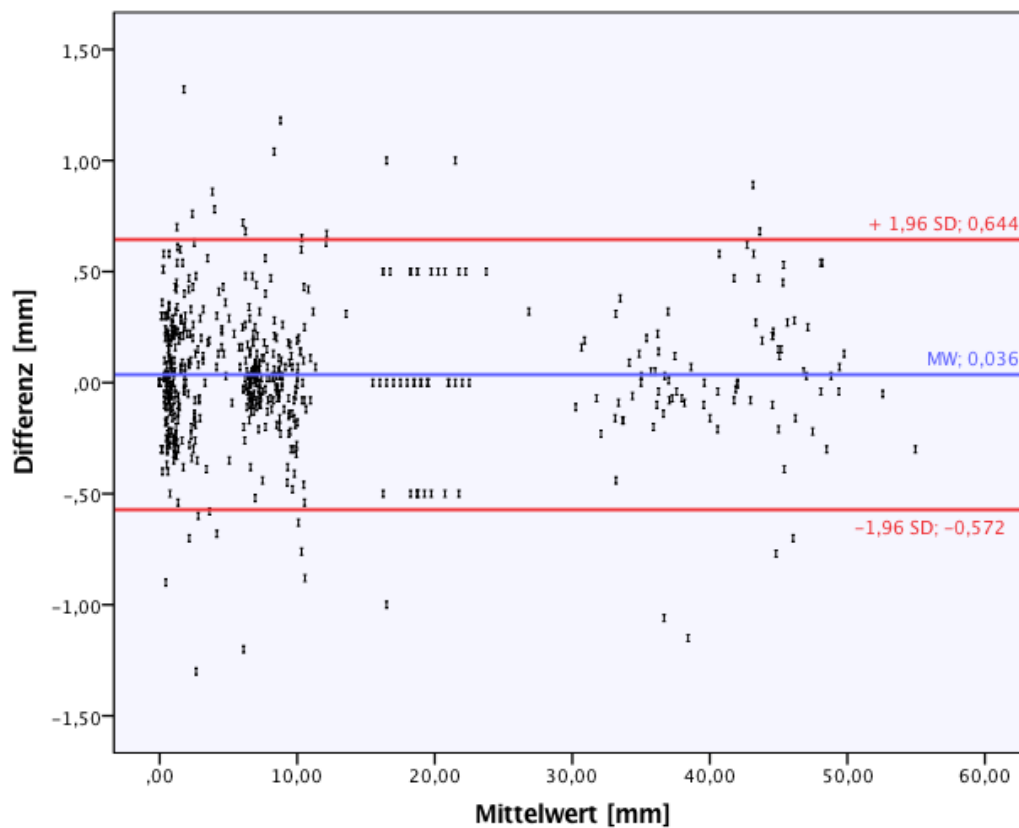


Abb. 31: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - Messwiederholung M1/M2

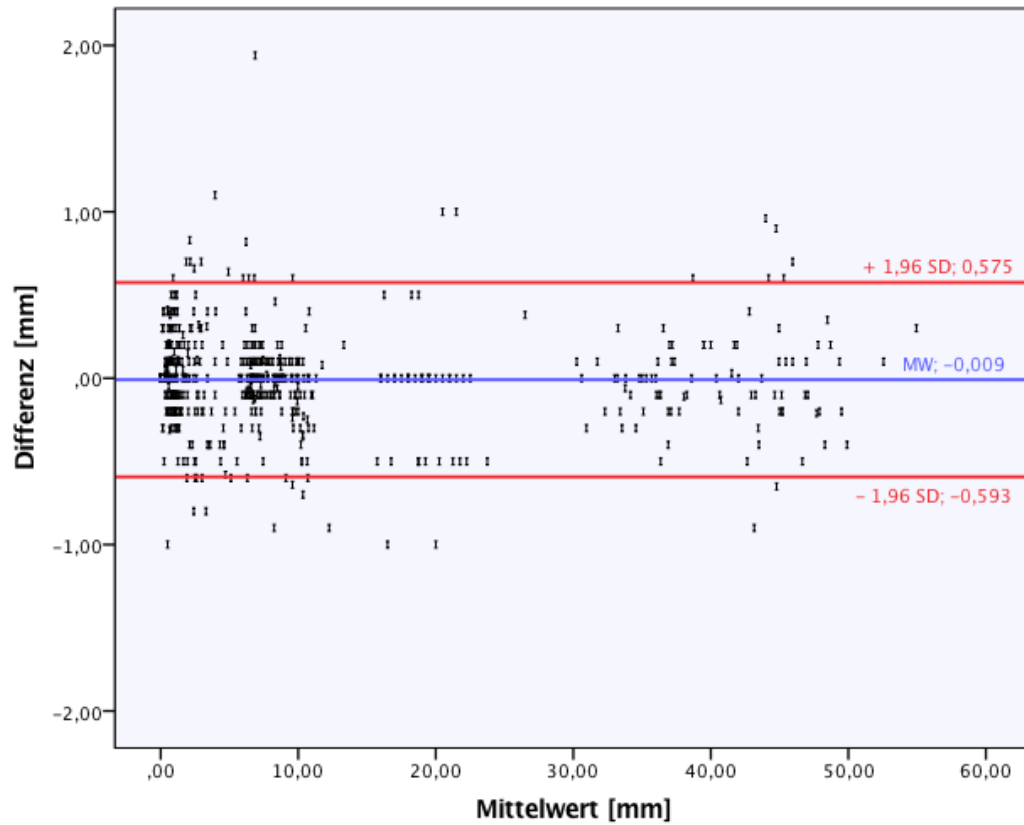


Abb. 32: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - Messwiederholung M2/M3

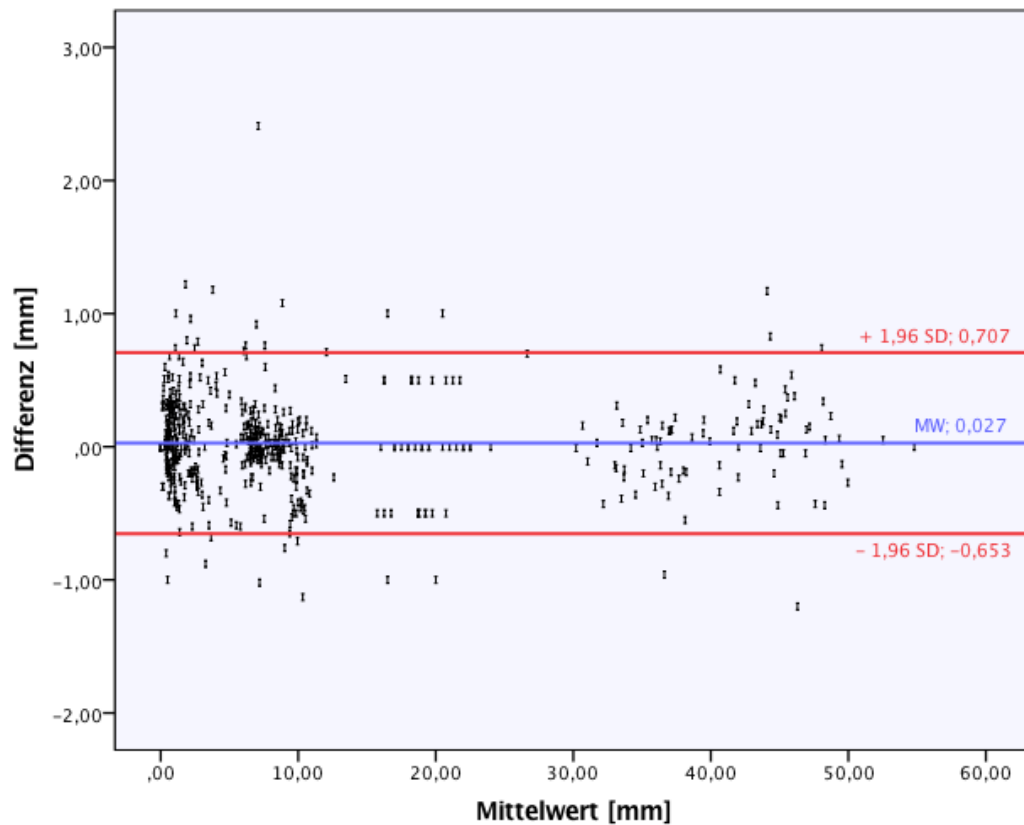


Abb. 33: Bland-Altman-Diagramm; Oberkiefer - Messwiederholung M1/M3

8.4.2 Unterkiefer

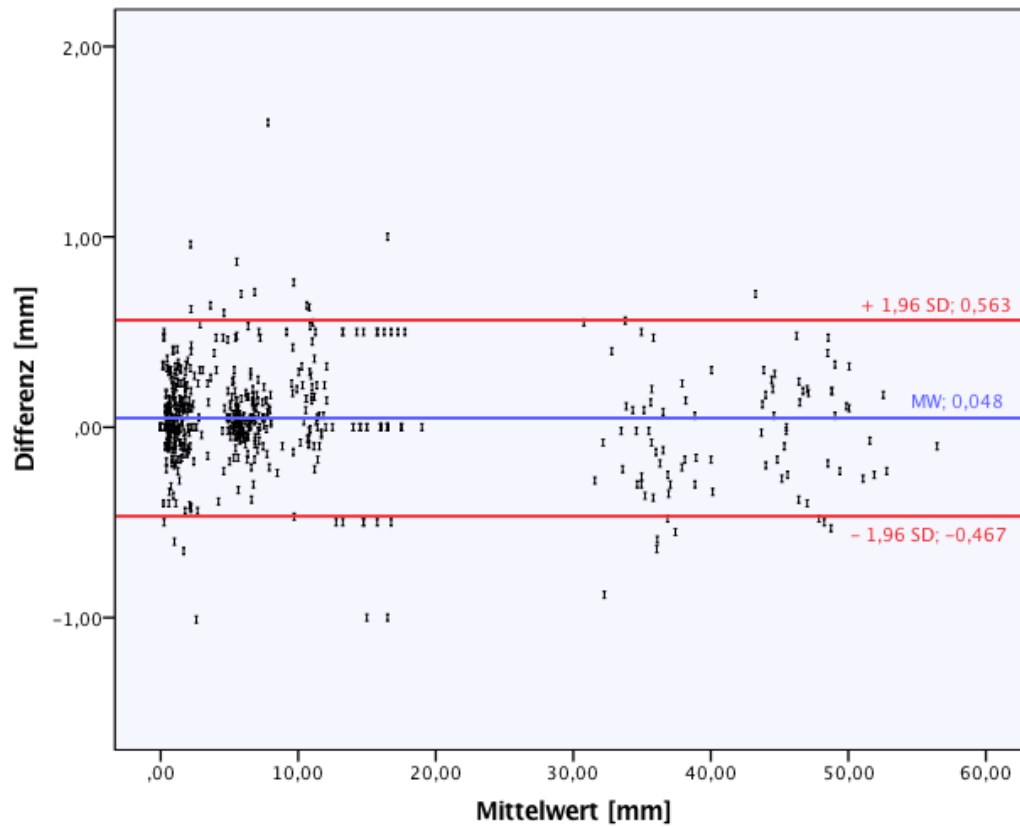


Abb. 34: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - Messwiederholung M1/M2

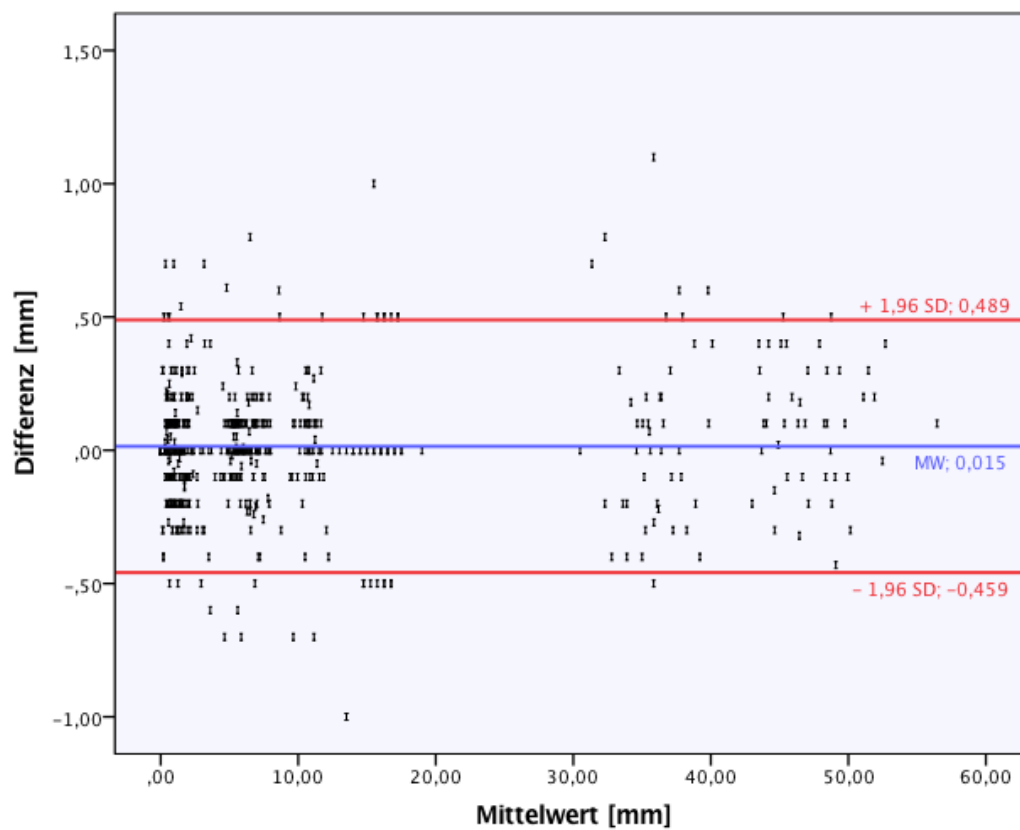


Abb. 35: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - Messwiederholung M2/M3

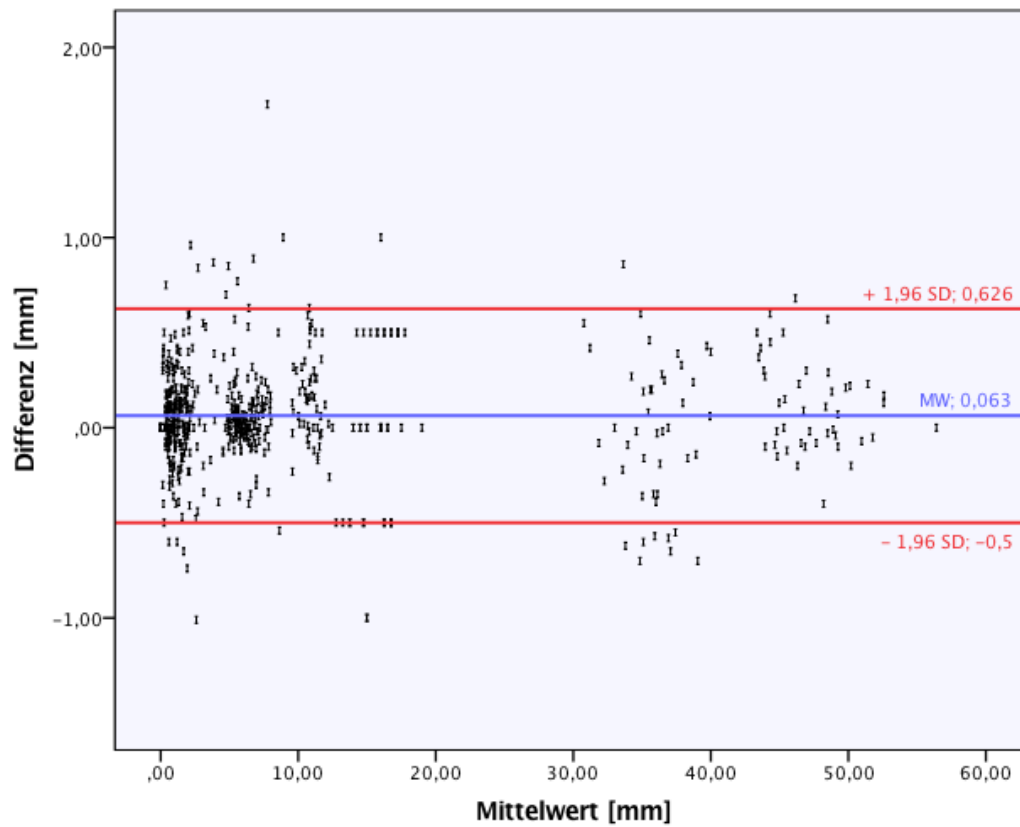


Abb. 36: Bland-Altman-Diagramm; Unterkiefer - Messwiederholung M1/M3